



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UNICEUB
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FAET
Curso de Engenharia da Computação
Projeto Final

CONTROLADOR DE TRÁFEGO: SEMÁFORO INTELIGENTE

Aluno: Saulo Cirineu Araújo – RA: 2021868/0

Professor Orientador: Claudio Penedo de Albuquerque

Brasília, DF
Dezembro/2006

SAULO CIRINEU ARAÚJO

CONTROLADOR DE TRÁFEGO: SEMÁFORO INTELIGENTE

Monografia apresentada à Banca Examinadora da Faculdade de Ciências e Tecnologia do Centro Universitário de Brasília, para conclusão do curso de Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Claudio Penedo de Albuquerque

Brasília, DF
Dezembro/2006

“Aos meus pais, João Domingos e Helena
Cirineu”.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a oportunidade de realizar este trabalho.

Ao DETRAN-DF, por ter me fornecido todos os livros que necessitei.

Ao Lima, chefe da Engenharia de Trânsito do DETRAN-DF, por ter me orientando em meus passos iniciais.

Ao professor Claudio Penedo, por reservar boa parte de seu apertado tempo para ajudar seus orientandos.

À Clarissa Messias, por mostrar persistência no desenvolvimento do cenário quando o autor deste trabalho já não tinha mais forças para continuar.

Aos colegas de trabalho, por terem se interessado tanto por este trabalho.

Aos meus grandes amigos, por trazerem alegria e descontração.

Ao Merlin, assistente do MS Office, por ter feito companhia em toda a confecção desta monografia.

E a aqueles que estão lendo este trabalho.

RESUMO

Controlar o tráfego de forma eficiente é tentar solucionar o problema desafiador do trânsito nos grandes centros urbanos, os quais estão ficando cada vez mais difíceis de trafegar devido à quantidade de veículos que por ali passam diariamente. O semáforo, quando implantado de forma correta, é um ótimo controlador de tráfego, pois ele possui a característica de intervir no direito de passagem para os diferentes movimentos de veículos, organizando o trânsito nas interseções, diminuindo os conflitos, aumentando a capacidade de escoamento e reduzindo a frequência de acidentes. Este trabalho propõe um controlador de tráfego de interseções que tenha inteligência o suficiente para se adaptar à demanda, ou seja, regular os tempos de verde proporcionalmente ao fluxo passante, a fim de diminuir ao máximo possível o atraso veicular.

Palavras chave: semáforo, interseção, cruzamento, microcontrolador, PIC.

ABSTRACT

Control the traffic in efficient way is trying to solve the challenging transit problem in urban centers, which are being more difficult to pass through due to amount of vehicles that pass daily. Traffic light, when used correctly, is an excellent traffic controller, because it possess the characteristic to intervene in the rights of crossing for the different movements, organizing the transit at intersections, diminishing the conflicts, increasing the draining capacity and reducing the frequency of accidents. This project proposes a traffic controller that has sufficient intelligence to adapt itself in function of the demand, and then regulate green time proportionally to the traffic flow in order to diminish vehicle delay.

Keywords: traffic light, intersection, cross-roads, microcontroller, PIC.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – INTERSEÇÕES.....	2
2.1 Movimento e Aproximação	5
2.2 Controle de Interseções.....	8
2.2.1 Tipos de Controladores.....	8
2.2.2 Estratégia de Operação	9
2.2.3 Controle Isolado do Cruzamento	9
2.2.4 Controle Arterial de Cruzamentos (Rede Aberta)	11
2.2.5 Controle de Cruzamento em Área (Rede Fechada).....	14
CAPÍTULO 3 – CRITÉRIOS PARA INSTALAÇÃO DE SEMÁFOROS.....	19
3.1 Condições para instalação de Semáforos	19
3.1.1 Mínimo Volume de Fluxo em Todas as Aproximações	20
3.1.2 Interrupção de Tráfego Contínuo	22
3.1.3 Volumes Conflitantes em Interseções com Muitas Aproximações	22
3.1.4 Volumes Mínimos de Pedestres que Cruzam a Via Principal	23
3.1.5 Índice de Acidentes	23
3.1.6 Melhoria do Sistema Progressivo	25
3.1.7 Controle de Áreas Congestionadas.....	25
3.1.8 Combinação de Critérios	25
3.2 Visibilidade	25
CAPÍTULO 4 – RECURSOS DE CONTROLE.....	27
4.1 Sincronismos com Outros Semáforos.....	27
4.2 Programação de Planos de Tráfego.....	31
4.2.1 Tempo de Ciclo	31
4.2.2 Porcentagem de Tempos de Verde de Cada Fase.....	31
4.2.3 Defasagem	33
4.3 Estratégias de Controle Comutáveis	34
4.3.1 Sistemas com planos de tráfego que variam segundo a hora do dia.....	35
4.3.2 Sistemas com variação segundo o tráfego	36
4.3.3 Sistema Centralizado de Controle por Computador	37
CAPÍTULO 5 – REGULAGEM DE SEMÁFOROS ISOLADOS.....	39
5.1 Capacidade e Fluxo de Saturação.....	39
5.2 Estimativa do Fluxo de Saturação e Tempo Perdido.....	42
5.2.1 Fluxo de Saturação	42
5.2.2 Tempo Perdido	43

5.3 Planos de Tráfego para Interseções Isoladas	44
5.3.1 Taxa de Ocupação e Grau de Saturação de uma Aproximação.....	44
5.3.2 Tempo de Ciclo Mínimo	46
5.3.3 Tempo de Ciclo Ótimo	48
5.3.4 Procedimento Prático para Dimensionamento dos Tempos de um Semáforo Isolado	54
5.4 Análise de Desempenho de uma Interseção Sinalizada	55
CAPÍTULO 6 – IMPLEMENTAÇÃO	57
6.1 Sensor Infravermelho de Presença	59
6.2 Controlador de Semáforo	61
6.2.1 Temporização	62
6.2.2 Decisões.....	63
6.3 Cenário	67
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO	71
BIBLIOGRAFIA	72
APÊNDICE A – MONTAGEM DO CENÁRIO.....	73
APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE	83
APÊNDICE C – MICROCONTROLADOR PIC16F72.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Movimentos conflitantes em um cruzamento.....	2
Figura 2.2 – Interseção congestionada.....	3
Figura 2.3 – Interseção controlada por tempo.....	4
Figura 2.4a – Movimento veicular possível em um primeiro sentido.....	6
Figura 2.4b – Movimento veicular possível em um segundo sentido.....	6
Figura 2.5 – Movimentos conflitantes (MV1 e MV3).....	7
Figura 2.6 – Aproximações em um cruzamento.....	7
Figura 2.7 – Formação e destruição típica de uma fila de veículos.....	10
Figura 2.8 – Ilustração de uma fila de veículos.....	10
Figura 2.9 – Exemplo de uma rede aberta.....	11
Figura 2.10 – Diagrama de espaço x tempo da “onda verde”.....	12
Figura 2.11 – Exemplo de uma rede fechada.....	14
Figura 2.12 – Problema típico de interdependência.....	17
Figura 3.1 – Cruzamento de duas vias.....	20
Figura 3.2 – Interseção com cinco aproximações.....	22
Figura 3.3 – Colisão corrigível pelo semáforo.....	23
Figura 3.4 – Colisão não corrigível pelo semáforo.....	23
Figura 3.5 – Esquema de distância de visibilidade.....	25
Figura 4.1a – Estágio 1, grande volume de veículos no trecho AB.....	26
Figura 4.1b – Estágio 2, pequeno volume de veículos no trecho AB.....	27
Figura 4.2 – Variação do volume de veículos em B.....	27
Figura 4.3a – Proibição de passagem da via principal (horizontal).....	28
Figura 4.3b – Permissão de passagem não sincronizada. Via secundária (vertical) bloqueada.....	29
Figura 4.3c – Via principal (horizontal) com permissão de passagem na interseção B, porém proibição de passagem na interseção A, gerando um desperdício de capacidade.....	29
Figura 4.4a – Diferenças na proporcionalidade de volume, período A.....	31
Figura 4.4b – Diferenças na proporcionalidade de volume, período B.....	32
Figura 4.5 – Via de mão dupla.....	33
Figura 4.6 – Gráfico do volume de tráfego diário.....	34
Figura 5.1 – Taxa de descarga da fila em períodos verdes totalmente saturados.....	38
Figura 5.2 – Formação e extinção da fila em uma aproximação e tempo mínimo de verde efetivo.....	45
Figura 5.3 – Taxa de ocupação por tempo de ciclo.....	47
Figura 5.4 – Gráfico do atraso uniforme.....	48
Figura 6.1 – PIC16F72.....	56
Figura 6.2 – Sensor de presença.....	56
Figura 6.3 – Interface do MPLAB®.....	57
Figura 6.4 – Programador ICD2 ^{BR}	58
Figura 6.5 – Circuito do sensor de presença.....	59
Figura 6.6 – Disposição dos sensores ao longo das aproximações.....	60
Figura 6.7 – Fluxograma do cálculo do tempo de verde.....	64
Figura 6.8 – Fluxograma da diminuição do tempo de verde previsto.....	65
Figura 6.9 – Fluxograma de decisão ao não fornecimento de período de verde.....	66
Figura 6.10 – Interseção utilizada no cenário do projeto.....	67
Figura 6.11 – Movimentos possíveis na interseção do protótipo.....	68

Figura A.1 - Tábua e as outras peças de MDF.....	72
Figura A.2 – Desenho inicial sobre a tábua.....	73
Figura A.3 – Tábua após os furos.....	74
Figura A.4 – Pintura da faixa de pedestres a área verde.....	74
Figura A.5 – Detalhe da pintura da região do asfalto.....	75
Figura A.6 – Aparência após a retirada da fita crepe.....	76
Figura A.7 – Retirada da fita crepe após a secagem da tinta na calçada.....	76
Figura A.8 – Pintura dos detalhes.....	77
Figura A.9 – Pintura das faixas.....	78
Figura A.10 – Cenário completamente pintando e com os protoboards.....	79
Figura A.11 – Solda dos contatos dos LEDs.....	79
Figura A.12 – Todos os contatos devidamente soldados e isolados.....	80
Figura A.13 – Cenário montado.....	81
Figura C.1 – Ciclo de instrução.....	97
Figura C.2 – Acoplamento de um oscilador externo no PIC16F72.....	98
Figura C.3 – Esquema eletrônico para utilização do oscilador em modo RC.....	99
Figura C.4 – Barramento de dados e de endereço típico dos microcontroladores PIC.....	100
Figura C.5 – Unidade Lógica e Aritmética típica dos microcontroladores PIC.....	101
Figura C.6 – Diagrama de blocos detalhado do PIC16F72.....	102
Figura C.7 – Organização da memória de programa do PIC16F72.....	109
Figura C.8 – Organização da memória de dados do PIC16F72.....	110
Figura C.9 – Simbolização de uma interrupção.....	111
Figura C.10 – Diagrama do circuito do TIMER0.....	113
Figura C.11 – Interseção utilizada no cenário do projeto.....	114
Figura C.12 – Movimentos possíveis na interseção do projeto.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Volumes mínimos de tráfego que justificam a instalação de um semáforo por volumes veiculares mínimos.....	19
Tabela 3.2 – Representação da quantidade de carros por horário.....	20
Tabela 3.3 – Valor médio das oito horas de fluxo.....	21
Tabela 3.4 – Volumes mínimos de tráfego que justificam a instalação de um semáforo por interrupção de tráfego contínuo.....	21
Tabela 4.1 – Volume de veículos nos horários de pico em uma via de mão dupla.....	33
Tabela 4.2 – Volume de veículos por faixa de horário.....	34
Tabela 4.3 – Distribuição de planos.....	35
Tabela C.1 – Selecionando o oscilador do PIC16F72.....	97
Tabela C.2 – Seleção de capacitores e osciladores de cristal.....	98
Tabela C.3 – Configuração dos bits 5 e 6 do registros STATUS.....	104
Tabela C.4 – Taxa do <i>prescaler</i> dependendo do módulo designado.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS

ALU	Arithmetic Logic Unit
CCP	Compare, Capture, PWM
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego
CI	Circuito Integrado
CNH	Carteira Nacional de Habilitação
CPU	Central Processor Unit
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
GPR	General Purpose Register
IDE	Integrated Development Environment
IR	Infra Red
LED	Light-Emitting Diode
PC	Program Counter
POR	Power-On Reset
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computer
SFR	Special Function Registers
SSP	Synchronous Serial Port

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A população brasileira está envelhecendo e assumindo um perfil semelhante ao dos países desenvolvidos¹, em que a pirâmide da idade populacional tende a ser mais larga no centro, onde se encontram as idades de 20 a 40 anos.

Como a única exigência para possuir uma Carteira Nacional de Habilitação (CNH) é ter mais de 18 anos e ter condições físicas e mentais mínimas, o número de elegíveis a possuir uma habilitação para conduzir um veículo está crescendo há vários anos, e assim tende a continuar.

Com a facilidade de comprar um veículo, usado ou novo, seja por meio de longos financiamentos, ou não, existe a tendência de chegar ao patamar de um veículo por CNH, o que é um número um tanto assustador, considerando que existem aproximadamente 41,5 milhões² de CNHs ativas no Brasil.

As vias urbanas devem ser preparadas para se adaptar ao grande volume de tráfego passante diariamente e à grande variação que ocorre durante um dia. Para isto, o modelo de controle de interseções de estratégia fixa já não é mais a melhor forma de controle, pois existe a necessidade de alterar a estratégia em função da demanda. Neste contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um semáforo inteligente e totalmente atuado que faça o controle do tráfego passante em uma interseção conforme a demanda local.

O trabalho está dividido em seis capítulos, sendo esta introdução o primeiro capítulo; o segundo uma breve explicação sobre conceitos básico da engenharia de tráfego voltada aos semáforos; o terceiro capítulo explica quais os critérios que devem ser levados em consideração ao implantar um semáforo; o quarto demonstra os recursos que um semáforo pode possuir; o quinto faz uma explicação da regulação de um semáforo isolado; e o sexto capítulo descreve a implementação do projeto.

¹ Fonte: IBGE, censo demográfico 2000.

² Fonte: DENATRAN, referente a agosto de 2006.

CAPÍTULO 2 – INTERSEÇÕES

As ruas e as avenidas são o meio físico de circulação dos veículos. Em um cruzamento de duas ou mais vias existem movimentos que não podem ser feitos simultaneamente, pois são conflitantes entre si, como ilustrado na Figura 2.1. Entretanto, pode-se estabelecer alguma norma de controle de direito de passagem com o objetivo de melhorar o fluxo do tráfego e reduzir os riscos de acidentes, tanto para veículos como para pedestres.

Em vias que apresentam um baixo fluxo de tráfego, os conflitos entre veículos são facilmente resolvidos pela regra de que o primeiro a chegar é o primeiro a atravessar ou pela regra da legislação, a qual concede a preferência à via da direita em relação ao condutor. No entanto, em ruas um pouco mais movimentadas essas regras não são obedecidas pelos condutores, o que causa várias discórdias e discussões, sendo necessário estabelecer novas regras de prioridade entre as aproximações do cruzamento para permitir a travessia da interseção.

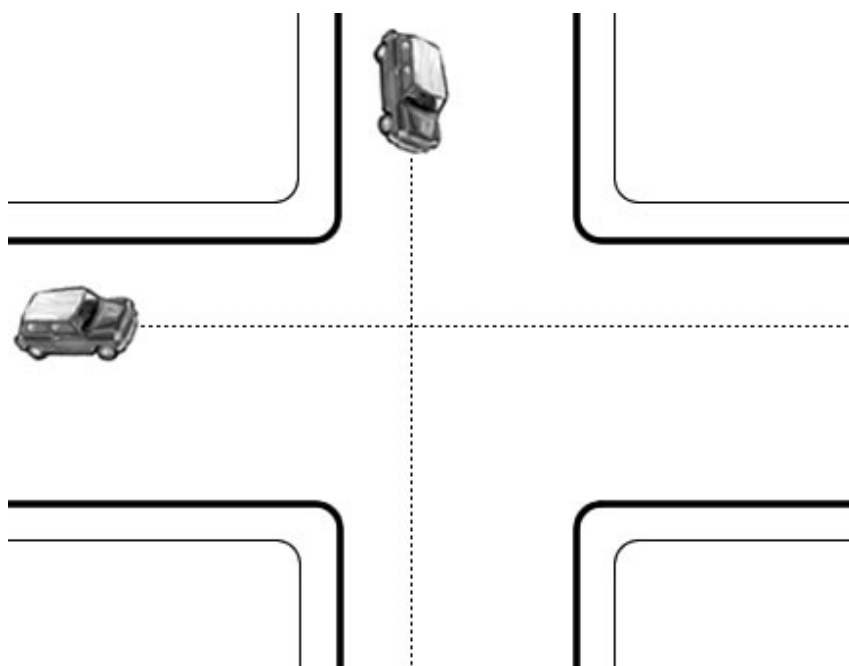


Figura 2.1 – Movimentos conflitantes em um cruzamento.

Fonte: Manual de Semáforos

Porém a regra de prioridade possui algumas falhas, já que os veículos da via secundária podem ter que esperar longos períodos de tempo caso o volume de tráfego da via principal esteja intermitente, conforme mostrado na Figura 2.2.

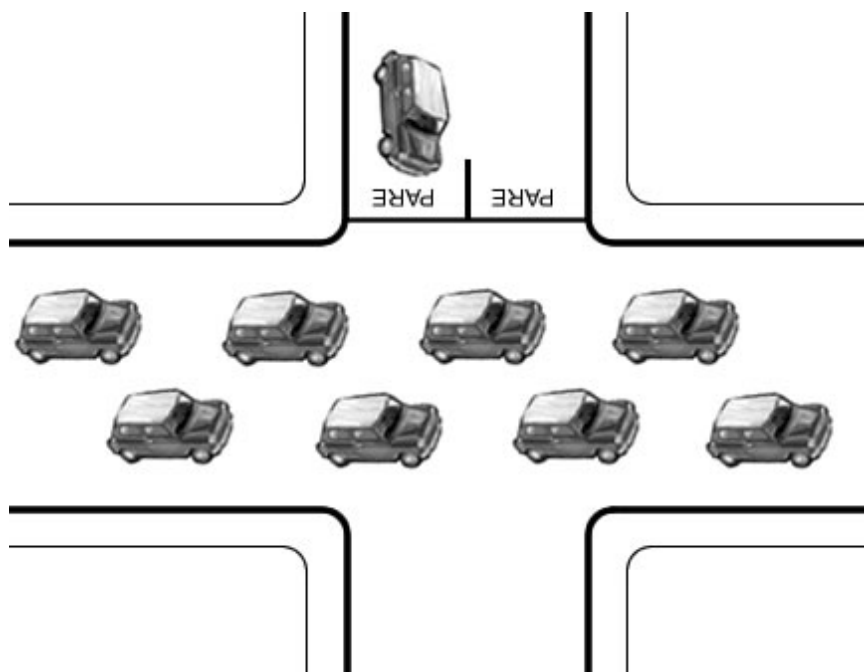


Figura 2.2 – Interseção Congestionada.

Fonte: Manual de Semáforos

Para superar este problema criou-se uma ordenação seqüencial e cíclica de permissões de travessia a uma interseção, que consiste em fornecer um período de tempo para realizar a travessia da interseção a uma determinada corrente de tráfego. Uma ilustração desta situação pode ser vista na Figura 2.3.

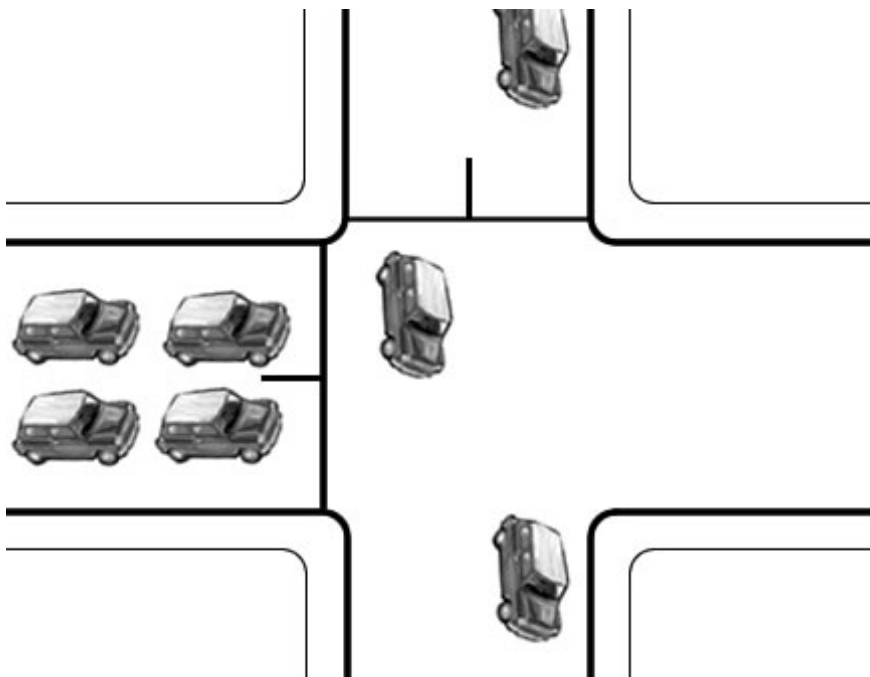


Figura 2.3 – Interseção controlada por tempo.

Fonte: Manual de Semáforos

A autorização e proibição de movimentos em uma interseção são feitas por um equipamento denominado semáforo.

O semáforo é um dispositivo de controle de tráfego que alterna o direito de passagem de veículos ou pedestres através de indicações luminosas transmitidas para motoristas e pedestres. É composto de focos luminosos afixados em grupos ao lado da via ou suspensos sobre ela por meio de postes de fixação.

Existem dois tipos de semáforos, os veiculares e os de pedestres. O foco deste trabalho será apenas o semáforo veicular.

O semáforo veicular é um dispositivo geralmente composto de três focos de luz de cores distintas, um de cor vermelha, outro de cor amarela e, por último, um de cor verde. Essas cores são padronizadas internacionalmente e têm funções específicas, regulamentadas no Código de Trânsito Brasileiro, conforme descrito a seguir:

- Verde: os condutores de veículos podem seguir em frente, virar à esquerda ou direita, a menos que estejam impedidos fisicamente por outro dispositivo de controle de tráfego ou autoridade legal;
- Amarelo: os condutores devem parar o veículo antes de entrar na região de cruzamento e permanecer parados até receber autorização de seguir em frente através da luz verde ou por uma autoridade legal. Caso não seja possível realizar a parada do veículo em segurança ou se não houver tempo hábil para realizar a parada, o condutor deve seguir em frente e cruzar a interseção;
- Vermelho: os condutores devem parar os veículos antes de entrar na interseção e permanecer parados até receber autorização para seguir em frente, seja pela sinalização da luz verde ou por uma autoridade legal.

O principal objetivo do semáforo veicular é permitir ou proibir a passagem do tráfego através das indicações luminosas verde/vermelho, respectivamente. Porém, para não proceder a uma interrupção brusca de movimento, criou-se o tempo de atenção, que é a situação intermediária entre movimento e parada, representado pela cor amarela. Portanto, ao receber a cor amarela, os condutores terão tempo suficiente para reagir à mudança de permissão.

Os tempos de cada indicação luminosa de um semáforo são denominados estágios ou intervalos, enquanto a seqüência de luzes (verde, amarelo e vermelho) em cada aproximação é denominada fase. O tempo total para a completa seqüência luminosa em todas as aproximações é denominado ciclo. E o tempo entre o fim do verde de uma fase (perda do direito de passagem) e o início de outra é denominado período entreverdes e geralmente possui a mesma duração do estágio amarelo. [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]

2.1 Movimento e Aproximação

O movimento representa a origem e o destino de veículos em uma interseção. Gráficamente é representado por um traço, indicando a direção, e uma seta, indicando o sentido.

As Figuras 2.4a e 2.4b representam o cruzamento de duas avenidas de mão única e quatro movimentos possíveis. Os movimentos MV1 e MV2, assim como os movimentos MV3 e MV4, possuem a mesma origem, porém destinos diferentes.

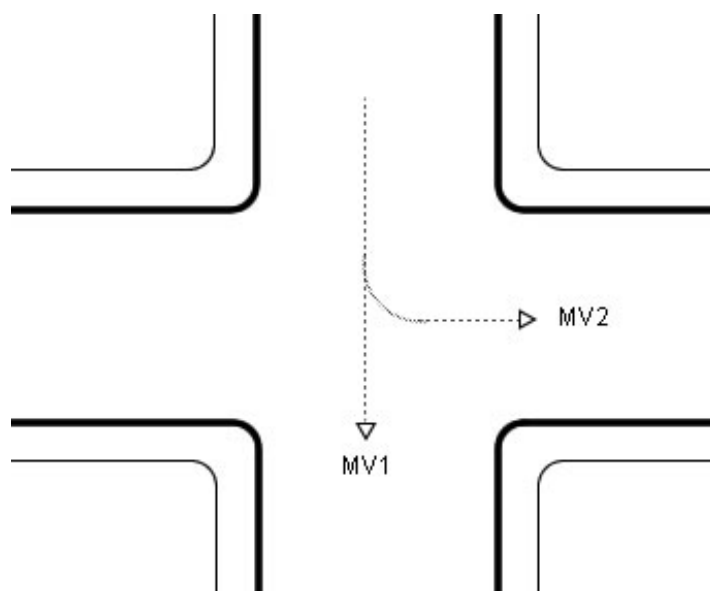


Figura 2.4a – Movimento veicular possível em um primeiro sentido.

Fonte: Manual de Semáforos

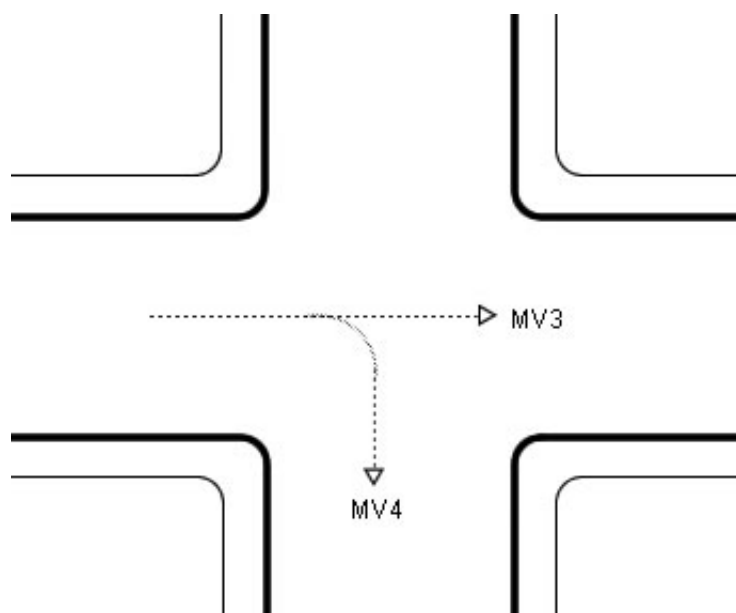


Figura 2.4b – Movimento veicular possível em um segundo sentido.

Fonte: Manual de Semáforos

Dois ou mais movimentos são ditos convergentes quando possuem o mesmo destino e origens distintas, divergentes quando partem da mesma origem para destinos diferentes. E ditos conflitantes quando se cruzam em uma mesma interseção, conforme ilustrado na Figura 2.5. [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]

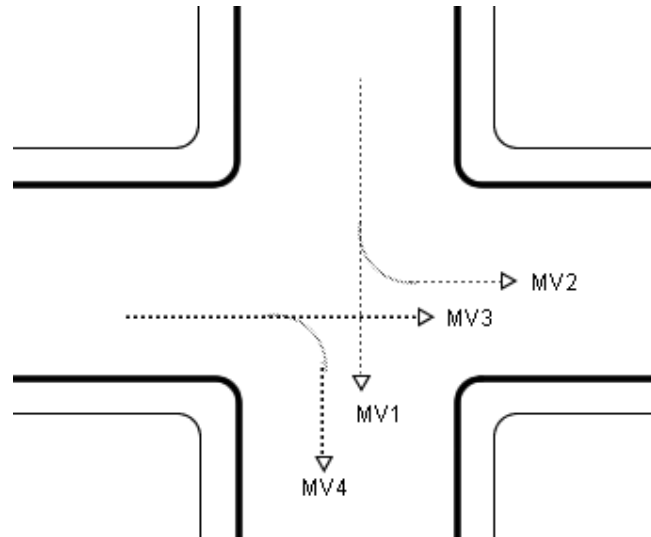


Figura 2.5 – Movimentos conflitantes (MV1 e MV3).

Os trechos de via que convergem para uma interseção são conhecidos como aproximações do cruzamento, a exemplo da Figura 1.6.

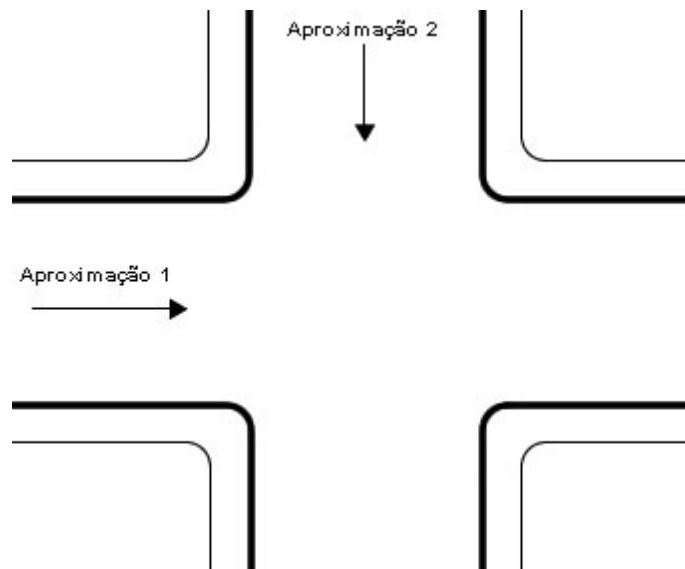


Figura 2.6 – Aproximações em um cruzamento.

Fonte: Manual de Semáforos

2.2 Controle de Interseções

A concessão do direito de passagem para os veículos atravessarem o cruzamento é dada através de indicações luminosas dos grupos focais de um semáforo. Para que haja a comutação das luzes o semáforo recebe comandos de um dispositivo denominado controlador de tráfego.

O DENATRAN define o controlador de tráfego com sendo “um equipamento que comanda o semáforo através do envio de pulsos elétricos para a comutação das luzes”. A determinação do tempo em que os pulsos deverão ser enviados ao semáforo pode ser feita de maneira manual, geralmente por um agente de trânsito e obedecendo a critérios pessoais de julgamento da situação do trânsito, ou de forma automatizada através de um computador constituído de uma programação interna resultante de um estudo prévio na interseção em questão.

2.2.1 Tipos de Controladores

Em relação ao tempo, os controladores de tráfego podem ser classificados como sendo do tipo tempo fixo ou por demanda de tráfego.

- **Tempo fixo:** nos controladores de tempo fixo o tempo de cada ciclo é constante, assim como a duração e os instantes de mudança dos estágios. Isso significa que independentemente do volume de tráfego passante os tempos de verde e vermelho serão sempre os mesmos e sua duração é calculada em função do volume de tráfego médio na interseção. O tempo de ciclo, duração e mudança dos estágios constituem um conjunto de parâmetros denominados de planos de tráfego. Alguns controladores permitem armazenar vários planos de tráfegos que podem ser ativados dependendo da hora e do dia.
- **Por demanda de tráfego:** esse tipo de controlador é mais complexo que o de tempo fixo por possuir sensores de detecção de veículos e uma lógica de decisão. A finalidade deste tipo de controlador é fornecer um tempo de verde a cada corrente de tráfego de acordo com a necessidade atual, sempre se ajustando dinamicamente com as alterações no volume passante na

interseção. Seu funcionamento baseia-se em variar o tempo de verde associado a um determinado estágio, entre um valor mínimo e um valor máximo. Se em um determinado período todas as correntes de tráfego atingirem a saturação, os tempos de verde serão alterados para o valor máximo, e o controlador de tráfego se comportará como sendo do tipo tempo fixo.

2.2.2 Estratégia de Operação

O controle de fluxo executado pelo controlador de tráfego é feito através de uma estratégia de operação adotada para o local, baseada em três políticas de controle básicas:

- **Controle isolado do cruzamento:** o controle do fluxo de tráfego é feito com base no volume de veículos existente na interseção local, não levando em consideração interseções adjacentes;
- **Controle arterial de cruzamento:** também conhecido como rede aberta, essa política baseia em preocupar-se em operar os semáforos de uma via principal com o intuito de dar continuidade de movimento entre as interseções vizinhas (“onda verde”);
- **Controle de cruzamentos em área:** denominado rede fechada, neste tipo de controle é levada em consideração todos os cruzamentos sinalizados de uma determinada região.

2.2.3 Controle Isolado do Cruzamento

Duas serão as análises a serem feitas para escolher o tipo do controlador, tempo fixo ou atuado:

- **Atraso veicular:** tempo total perdido durante o período de vermelho, incluindo tempo perdido na desaceleração (formação da fila) e aceleração (destruição da fila). Um comportamento típico da formação e destruição da fila pode está representando na Figura 2.7;

- **Capacidade da interseção:** quantidade máxima de veículos que conseguem atravessar o cruzamento em um intervalo de tempo.

O controlador ideal é aquele que produza o menor atraso possível e a maior capacidade da interseção.

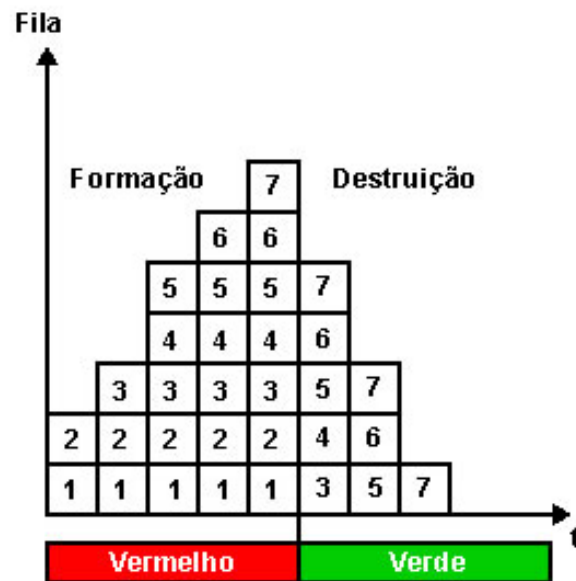


Figura 2.7 – Formação e destruição típica de uma fila de veículos.

Fonte: Manual de Semáforo

A ilustração da fila em questão pode ser visualizada na Figura 2.8.

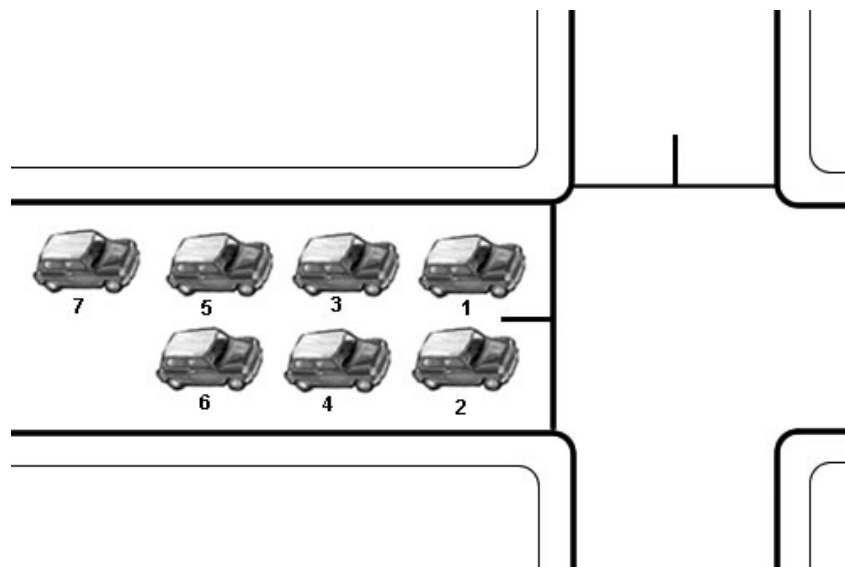


Figura 2.8 – Ilustração de uma fila de veículos.

Fonte: Manual de Semáforo

Decidir por um controlador de tempo fixo significa elaborar planos de tráfego, ou seja, devem ser estabelecidos o tempo de ciclo, seqüência e duração de cada estágio. Já a opção de utilizar o controlador de tráfego atuado induz que a duração dos ciclos e estágios não será pré-fixada e sim ajustada em tempo real. Entretanto deve-se ter muito cuidado na localização dos sensores para que o sistema trabalhe de forma adequada, além de ser necessário programar os valores limites, tempo máximo e mínimo, de duração dos estágios.

Outro fator importante a ser considerado é a natureza aleatória de chegada de veículos à interseção. Estudos mostraram que a melhor forma de estimar o tráfego de chegada em um cruzamento é através da distribuição de Poisson [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]. Isso significa que existe uma forte variação do volume de veículos que chegam ao longo dos ciclos.

2.2.4 Controle Arterial de Cruzamentos (Rede Aberta)

O objetivo principal desta estratégia é coordenar os semáforos ao longo de uma via arterial a fim de estabelecer um sistema progressivo de aberturas, ou início do tempo de verde, resultando na máxima continuidade de fluxo entre as interseções adjacentes, a exemplo da Figura 2.9, e mínima interrupção do tráfego. Portanto o conjunto de semáforos de uma via arterial nesta estratégia é considerado um sistema.

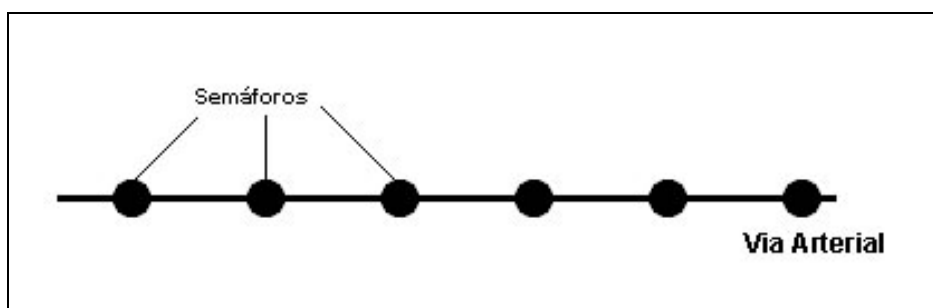


Figura 2.9 – Exemplo de uma rede aberta.

Fonte: Manual de Semáforo

Essa proposta tem como princípio básico que os veículos ao receberem autorização de movimento atravessam o cruzamento em blocos e assim continuam até alcançar o semáforo seguinte.

Calculando o tempo médio de percurso entre um semáforo e o seu subsequente é possível estabelecer uma coordenação entre os inícios do sinal verde a fim de não interromper o fluxo de veículos da via arterial.

A diferença de tempo entre o início da abertura do primeiro semáforo para o segundo é denominada defasagem. Dessa forma, o controle dos semáforos de maneira coordenada é feito através do ajuste da defasagem entre eles. E para manter os valores de defasagem constantes é necessário que o ciclo também se mantenha constante, portanto devem ser adotados controladores de tráfego de tempo fixo.

No diagrama abaixo é representado o conceito de controle do fluxo de tráfego em vias arteriais.

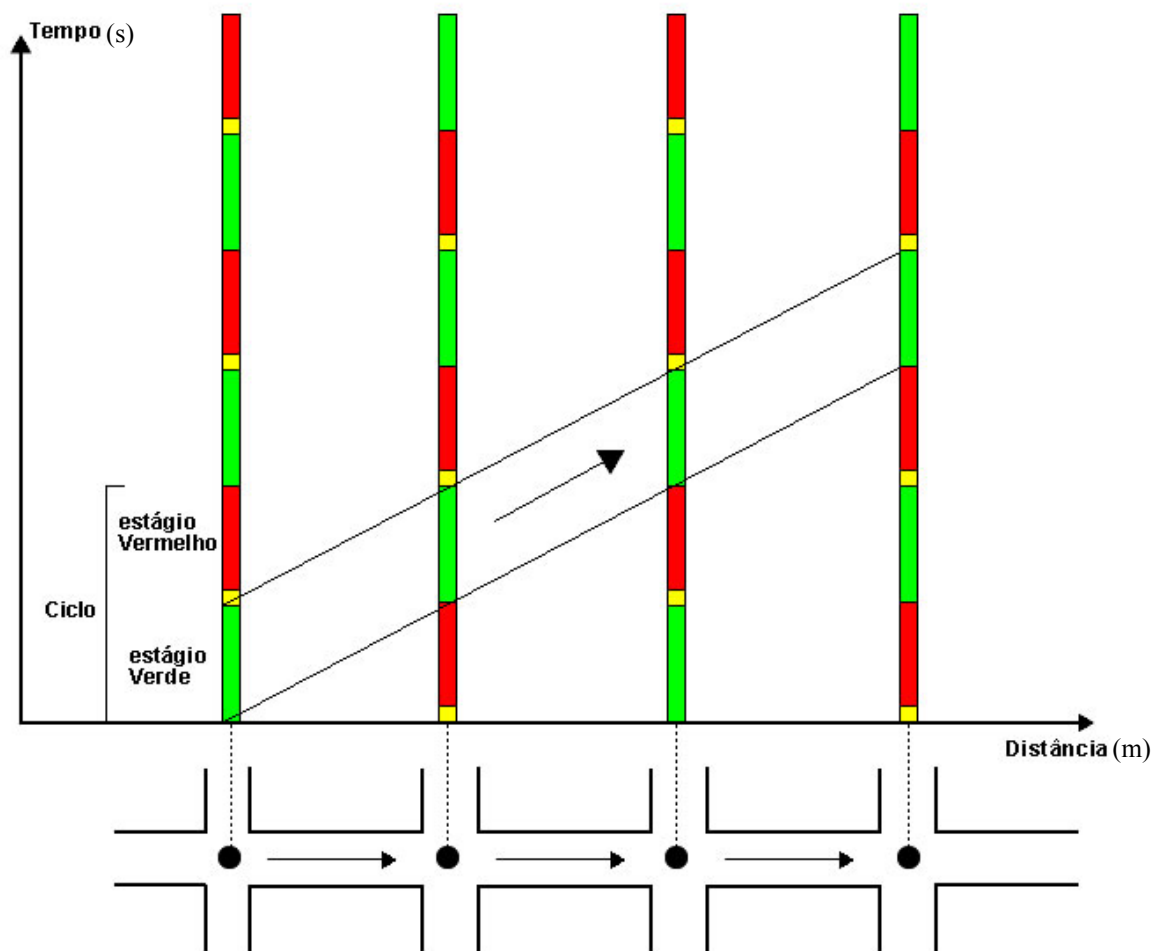


Figura 2.10 – Diagrama de espaço x tempo da “onda verde”.

Fonte: Manual de Semáforo

No diagrama da Figura 2.10 o tempo e os intervalos de duração dos estágios são desenhados na vertical, enquanto as distâncias entre as interseções estão dispostas na horizontal. As retas inclinadas indicam a velocidade de progressão que os veículos deverão apresentar para transpor os cruzamentos no sinal verde e o espaço compreendido entre dois ciclos paralelos é denominado banda de passagem.

A inclinação da banda de passagem representa a velocidade de progressão do tráfego e é denominada de velocidade da banda. A largura da banda de passagem representa o intervalo de tempo, em segundos, disponível para um veículo transpor a distância compreendida entre uma interseção e a seguinte.

Para uma correta coordenação dos semáforos de uma via arterial é necessário, ainda, considerar alguns fatores básicos [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]:

- a) **Distância entre as interseções sinalizadas:** distância entre semáforos adjacentes. Pode variar de 50m a 600m. A necessidade de coordenar semáforos é inversamente proporcional à distância entre eles;
- b) **Operação da via:** vias de mão dupla e mão única devem ser tratadas de forma distintas. A complexidade aumenta em vias de mão dupla;
- c) **Número de estágios e fases das interseções:** algumas interseções possuem poucas fases e estágios, porém algumas interseções demandarão estágios especiais, como, por exemplo, conversão à esquerda ou direita;
- d) **Perfil de chegada à interseção:** os veículos podem chegar uniformemente à interseção ou em blocos. A necessidade desta análise se dá pelo fato de quanto mais uniforme for a chegada dos veículos, menos será a necessidade de coordenação dos semáforos;
- e) **Flutuações do tráfego ao longo do dia:** durante o período do dia, as características de chegada e volume do fluxo de veículos variam consideravelmente.

2.2.5 Controle de Cruzamento em Área (Rede Fechada)

Com o aumento do fluxo de veículos, os corredores de tráfego receberam uma solicitação ainda maior, tornando o tráfego mais carregado e lento. Para evitar os congestionamentos alguns condutores passaram a percorrer rotas alternativas, utilizando vias secundárias. Por isso foi necessária a instalação de semáforos em locais que antes não necessitavam deles.

Portanto, os sistemas arteriais típicos (corredores) foram se descaracterizando, dando lugar a uma extensa rede de semáforos, originando o controle de tráfego por região, conforme ilustra a Figura 2.11.

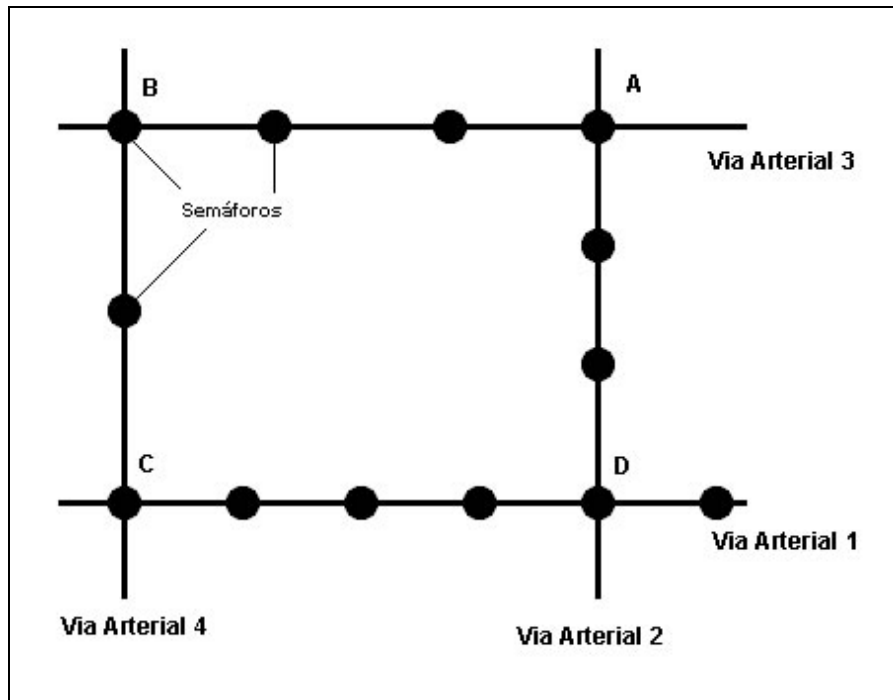


Figura 2.11 – Exemplo de uma rede fechada.

No exemplo da Figura 2.5 as vias arteriais se cruzam nos pontos A, B, C e D. Então os planos de tráfego são interdependentes nestes quatro pontos, caracterizando uma rede fechada. Este tipo de configuração ocorre comumente nos grandes centros urbanos.

Três são os modelos de controle de tráfego utilizado neste tipo de configuração:

- **Sistemas que utilizam planos de tempo fixo:** baseado em dados do comportamento do tráfego na região, os tempos de ciclo e estágio são calculados previamente e aplicados nos controladores de tráfego;
- **Sistemas em que cada interseção da rede é atuada localmente:** um controlador de tráfego efetua as mudanças de estágio com base na detecção de veículos, porém vinculada a plano básico de coordenação;
- **Sistemas totalmente atuados:** os períodos de verde de cada estágio são continuamente calculados em função da detecção de veículos. Também é denominado de sistema em tempo real.

No controle de rede fechada é necessário realizar um mapeamento de quais interseções sinalizadas deverão ser agrupadas e trabalharão de forma conjunta. O ideal é que todos os cruzamentos de uma área trabalhassem conjuntamente, porém existem limitações técnicas que não permitem esta situação, como capacidade dos controladores, disponibilidade dos equipamentos, distância entre as interseções, entre outros. Assim o controle de uma área é feito através do controle de subáreas independentes.

Ao mapear uma subárea é necessário agrupar interseções que demandem estratégias de controle semelhantes. Para tanto, deve-se considerar alguns fatores:

- **Relação geográfica:** distância entre as interseções e existência de barreiras naturais ou artificiais como rio, ponte, cruzamento em nível com ferrovia etc. As interseções de uma subárea devem ser adjacentes entre si;
- **Volume de Tráfego:** quanto maior for o volume de tráfego na via, maior será a necessidade de fazer a coordenação;
- **Características do fluxo:** quando a chegada de veículos à interseção for em pelotões cíclicos, a coordenação dos semáforos resultará em uma redução no atraso e número de paradas do fluxo. Porém, se a chegada de veículos ocorrer de forma constante o período de vermelho produzirá sempre os mesmos valores de atraso e parada.

O índice de dependência pode ser utilizado para considerar a necessidade de coordenação entre duas interseções sinalizadas:

$$i = \frac{0,5}{1+t} \left(\frac{x \cdot q_{\max}}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} - 1 \right) \quad (2.1)$$

onde:

i = índice de interdependência

t = tempo de percurso entre ambos os semáforos (minutos)

x = número de faixas

q_{max} = fluxo direto procedente do trecho anterior (veículos / hora)

$q_1 + q_2 + \dots + q_n$ = fluxo total que chega à interseção (veículos / hora)

O índice de interdependência assume valores entre 0 e 1, sendo 0 representando a não dependência e 1 indicando uma forte dependência. Quando o índice estiver entre 0 e 0,34 é recomendado o controle isolado. Entre 0,35 e 0,43 o controle pode ser isolado ou coordenado, pois os resultados de ambas as estratégias serão semelhantes. Acima de 0,44 é desejável a utilização de semáforos coordenados.

A Figura 2.12 ilustra um típico problema de interdependência:

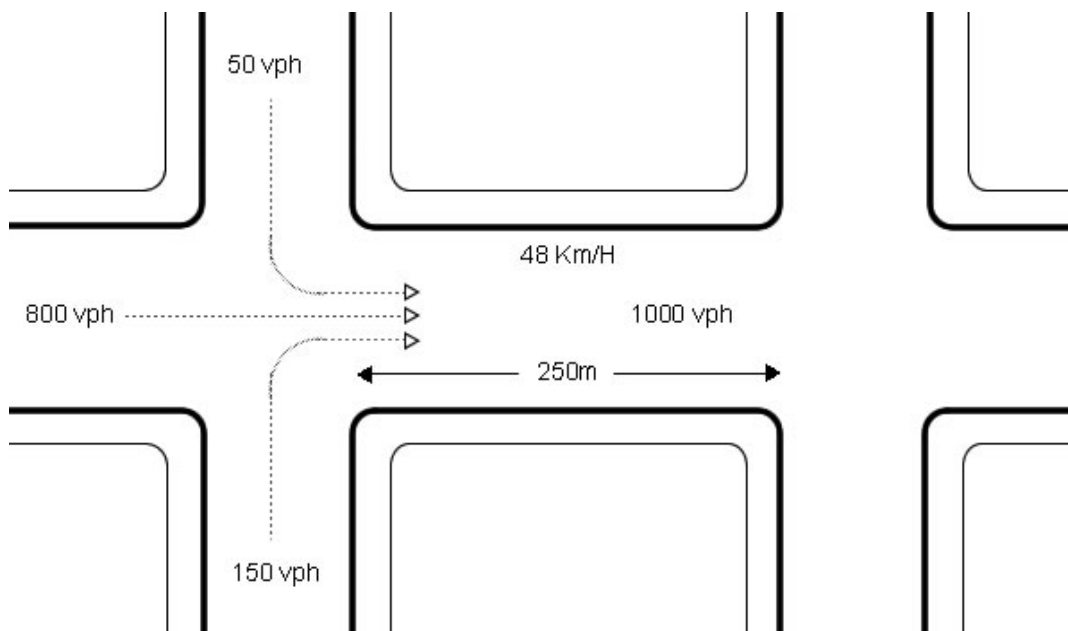


Figura 2.12 – Problema típico de interdependência.

Fonte: Manual de Semáforos

Supondo três faixas na via que liga os dois cruzamentos, tem-se:

$$V_m = \frac{48000}{60} = 800m / \text{min}$$

$$t = \frac{250}{800} = 0,31 \text{ min}$$

$$i = \frac{0.5}{1,31} \left(\frac{3.800}{800 + 150 + 50} - 1 \right)$$

$$i = 0,38 \left(\frac{2400}{1000} - 1 \right)$$

$$i = 0,53$$

Portanto, neste exemplo é desejável a operação coordenada entre ambos os semáforos.

CAPÍTULO 3 – CRITÉRIOS PARA INSTALAÇÃO DE SEMÁFOROS

Antes de decidir pela implantação de um semáforo, deve ser analisada cuidadosamente a necessidade de controlar o tráfego no local, já que o controle de passagem feito através de paradas periódicas obrigatórias pode aumentar o tempo de travessia de uma interseção.

Existem algumas medidas que devem ser consideradas antes mesmo de iniciar os estudos para a implantação de um semáforo [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]:

- Melhoria na sinalização vertical;
- Remoção de interferências que prejudiquem a visibilidade;
- Mudança na geometria da interseção;
- Melhoria da iluminação;
- Controle das velocidades de aproximação.

Se nenhuma dessas alternativas for suficiente para resolver o problema, então deve-se decidir pela utilização do semáforo.

3.1 Condições para instalação de Semáforos

Alguns critérios devem ser obedecidos a fim de justificar a instalação de um semáforo em uma interseção:

1. Mínimo volume de fluxo em todas as aproximações;
2. Interrupção de tráfego contínuo;

3. Volumes conflitantes em interseções de cinco ou mais aproximações;
4. Mínimo volume de pedestres que cruzam a via principal;
5. Índice de acidentes;
6. Melhoria de sistema progressivo;
7. Controle de áreas congestionadas;
8. Combinação de critérios.

3.1.1 Mínimo Volume de Fluxo em Todas as Aproximações

A implantação de um semáforo é justificada quando tem-se, no cruzamento, os seguintes volumes de tráfego mínimos apresentados na Tabela 3.1, considerando o volume médio medido nas oito horas de maior movimento na interseção:

Tabela 3.1 – Volumes mínimos de tráfego que justificam a instalação de um semáforo por volumes veiculares mínimos

Faixas de aproximação		Veículos por hora	
Preferencial	Secundária	Preferencial	Secundária
1	1	500	150
2 ou mais	1	600	150
2 ou mais	2 ou mais	600	200
1	2 ou mais	500	200

Na Figura 3.1 é ilustrado a aplicação deste conceito:

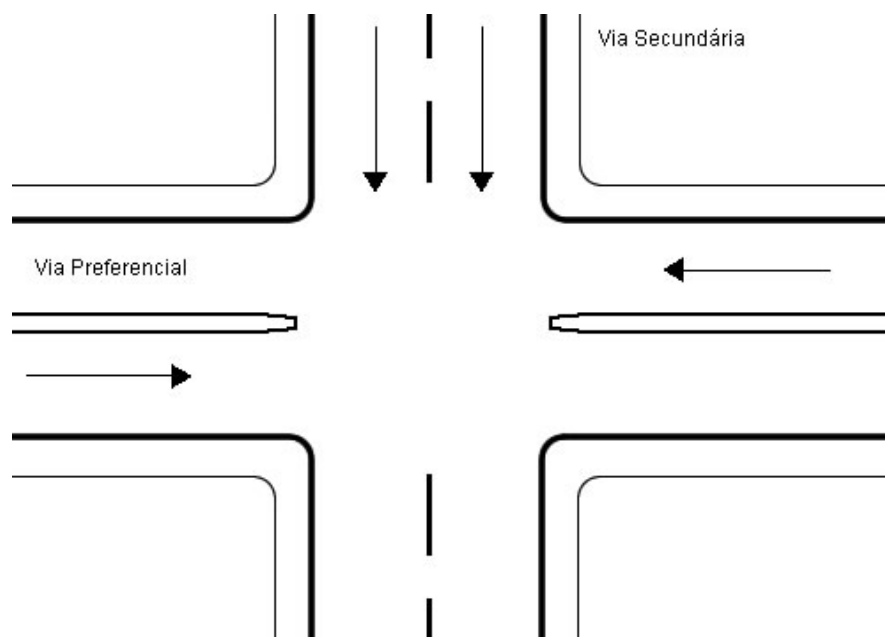


Figura 3.1 – Cruzamento de duas vias.

Fonte: Manual de Semáforos

Supondo uma via preferencial com dois sentidos de tráfego e uma faixa de aproximação, e uma via secundária com mão única e duas faixas de aproximação, tem-se o seguinte volume de tráfego hipotético:

Tabela 3.2 – Representação da quantidade de carros por horário.

Hora	Via preferencial (2 sentidos)	Via secundária	Volume Total
7:00 – 8:00	720	390	1110 ¹
8:00 – 9:00	750	420	1170 ¹
9:00 – 10:00	500	320	820 ¹
10:00 – 11:00	465	200	665
11:00 – 12:00	420	180	600
12:00 – 13:00	530	220	750 ¹
13:00 – 14:00	455	205	660
14:00 – 15:00	420	180	600
15:00 – 16:00	480	190	670
16:00 – 17:00	555	200	755 ¹
17:00 – 18:00	610	210	820 ¹
18:00 – 19:00	790	290	1080 ¹
19:00 – 20:00	570	170	740 ¹

¹ Oito horas de maior movimento na interseção.

Com base na Tabela 3.2 é calculada a média dos horários de maior movimento para ambas as vias, conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valor médio das oito horas de maior fluxo.

Via Preferencial	Via Secundária
628	277

Mediante esses valores, este critério indicaria a implantação de um semáforo na interseção.

3.1.2 Interrupção de Tráfego Contínuo

O tráfego de uma via secundária pode enfrentar dificuldade excessiva para atravessar ou para entrar na via primária devido ao grande fluxo desta última, gerando grandes atrasos e justificando a implantação de um semáforo.

Os volumes mínimos são apresentados na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Volumes mínimos de tráfego que justificam a instalação de um semáforo por interrupção de tráfego contínuo.

Faixas de aproximação		Veículos por hora	
Preferencial	Secundária	Preferencial	Secundária
1	1	750	75
2 ou mais	1	900	75
2 ou mais	2 ou mais	900	100
1	2 ou mais	750	100

3.1.3 Volumes Conflitantes em Interseções com Muitas Aproximações

Em uma interseção que possua cinco ou mais aproximações, conforme ilustrado pela Figura 3.2, e um volume de tráfego de mais de 800 veículos por hora, a implantação do semáforo é justificada desde que seja descartada a possibilidade de transformar a interseção em outra equivalente com um número igual ou inferior a quatro aproximações.

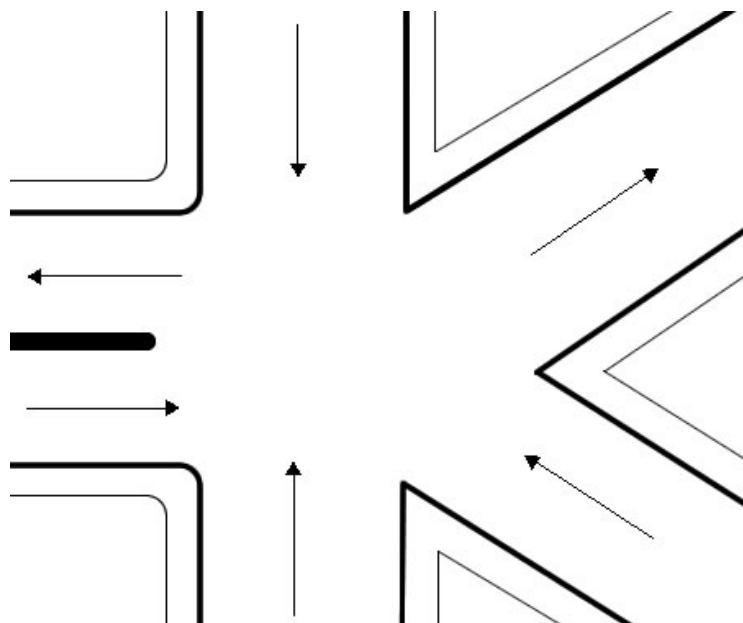


Figura 3.2 – Interseção com cinco aproximações.

3.1.4 Volumes Mínimos de Pedestres que Cruzam a Via Principal

Nos locais onde muitos pedestres cruzam a via principal, pode ser necessária a instalação de semáforos para auxiliar a travessia ou para evitar o congestionamento de veículos, caso haja uma faixa sinalizada de pedestres.

O conflito entre veículos e pedestres justifica a implantação de um semáforo quando atravessam no mínimo 250 pedestres por hora e trafegam no mínimo 600 veículos por hora, caso seja uma via de mão dupla com canteiro central, ou 1000 veículos por hora caso seja uma via de mão única ou dupla sem canteiro central.

3.1.5 Índice de Acidentes

A ocorrência de colisões e atropelamentos pode justificar a instalação de semáforos desde que os acidentes registrados sejam do tipo corrigível por um semáforo, conforme ilustrado na Figura 3.3, e que todas as tentativas anteriores para tentar diminuir os acidentes não tenham atingido o objetivo.

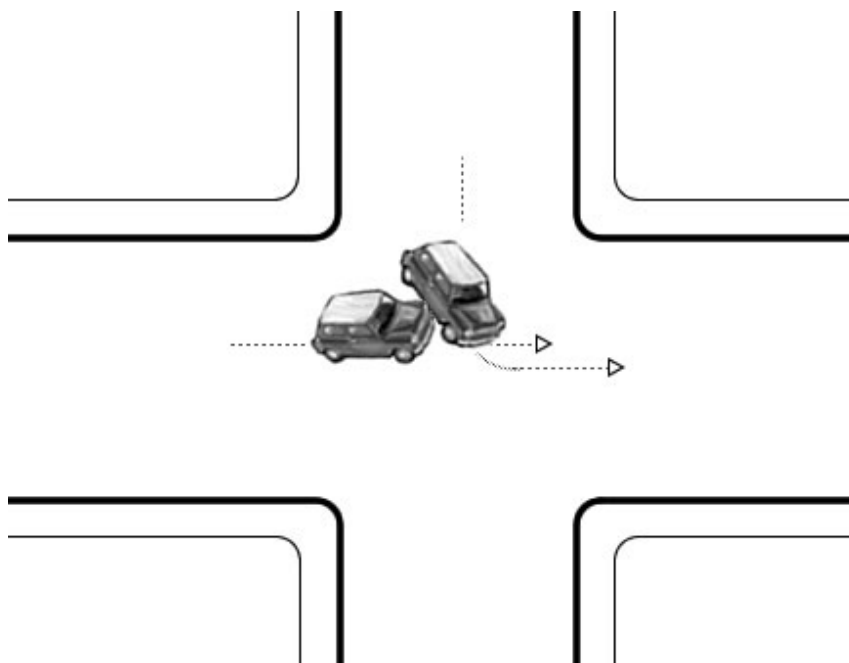


Figura 3.3 – Colisão corrigível pelo semáforo.

Fonte: Manual de Semáforos

Na Figura 3.4 é ilustrada uma colisão não corrigível por um semáforo.

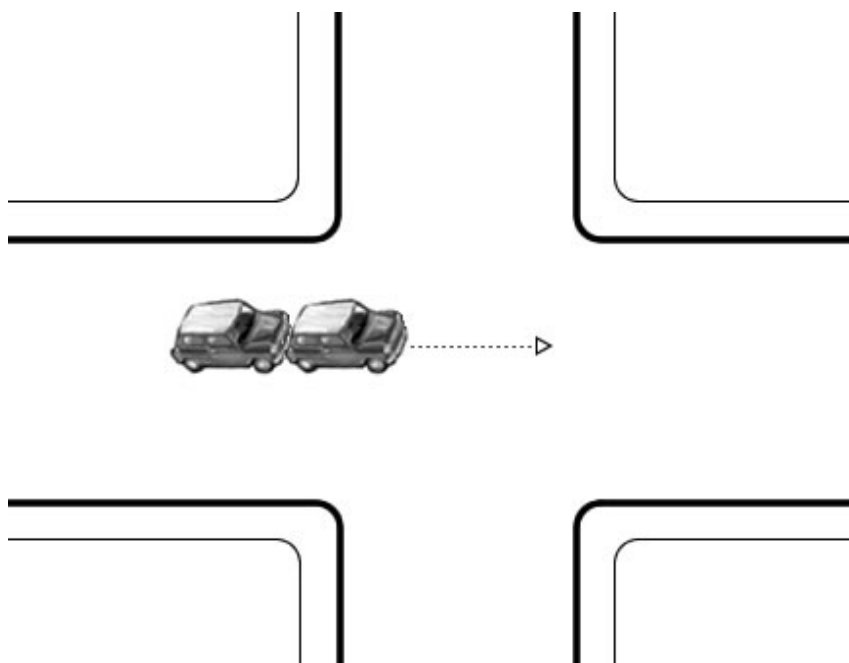


Figura 3.4 - Colisão não corrigível pelo semáforo.

3.1.6 Melhoria do Sistema Progressivo

Em vias com sistema coordenado de semáforos pode ser desejável instalar um novo semáforo para ajustar a velocidade de progressão ou com o objetivo de melhorar a formação dos pelotões.

3.1.7 Controle de Áreas Congestionadas

Em áreas onde a capacidade da aproximação é inferior ao tráfego passante, gerando um congestionamento constante e formação de fila capaz de bloquear o cruzamento anterior, justifica-se a instalação de um semáforo, colocado na interseção anterior para evitar o bloqueio das vias.

3.1.8 Combinação de Critérios

Em locais que não atendam totalmente nenhum dos critérios citados anteriormente, e que mesmo assim registra uma alta porcentagem de vários critérios, a instalação de um semáforo pode ser justificada.

3.2 Visibilidade

“Define-se por distância de visibilidade a visão que o motorista tem ao se aproximar de uma interseção de modo que ele perceba qual o comprimento das vias interceptantes”. (Manual de Semáforos, 1984, pág. 46)

A distância de visibilidade da interseção pelo condutor do veículo pode alterar valores mínimos dos critérios. Um esquema para cálculo da visibilidade em uma interseção está representado pela Figura 3.5.

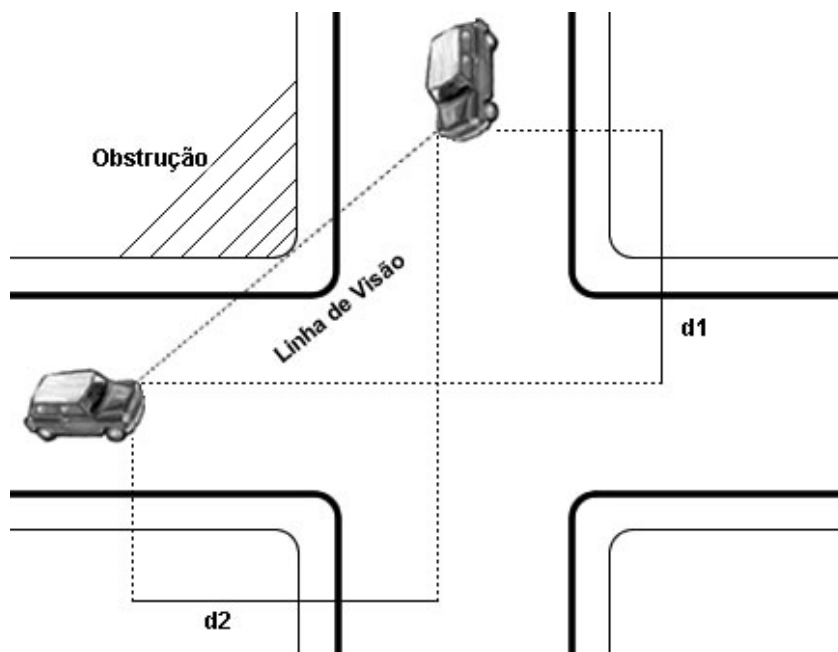


Figura 3.5 – Esquema da distância de visibilidade.

Fonte: Manual de Semáforos

Em interseções onde a visibilidade é muito baixa, os valores mínimos dos critérios devem ser reduzidos em 20%. Já em locais onde a visibilidade é bastante ampla, os critérios mínimos devem ser acrescidos em 20%.

CAPÍTULO 4 – RECURSOS DE CONTROLE

Antes da implantação do semáforo, devem ser analisadas as condições de operação do cruzamento, a fim de especificar os recursos que o controlador de tráfego deverá possuir para comandar o semáforo.

Os principais recursos disponíveis em um controlador de tráfego são: a capacidade de sincronismo com outros semáforos, possibilidade de programação de planos de tráfego e estratégias de controle comutáveis.

4.1 Sincronismos com Outros Semáforos

Este recurso permite que um semáforo sincronize com o semáforo adjacente quando o movimento de saída deste semáforo para o próximo não se comporta de forma constante, a exemplo das Figuras 4.1a e 4.1b.

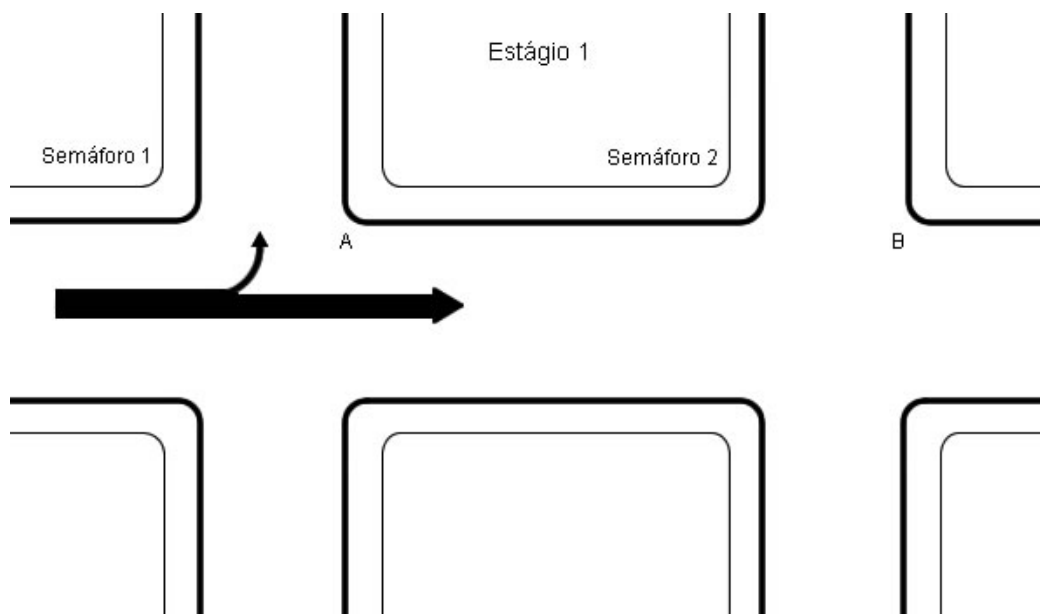


Figura 4.1a – Estágio 1, grande volume de veículos no trecho AB.

Fonte: Manual de Semáforos

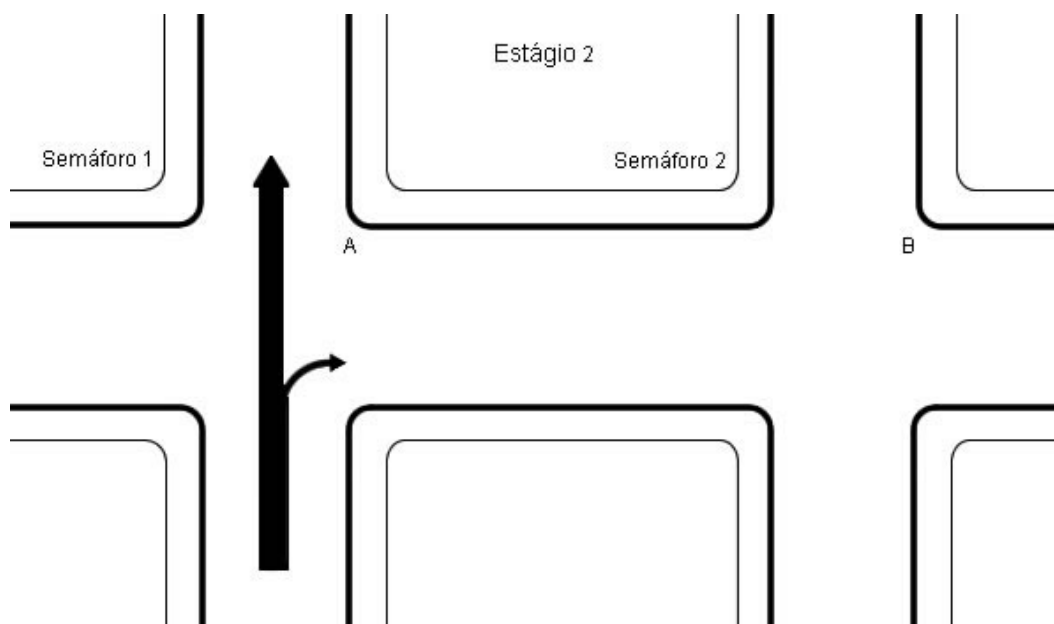


Figura 4.1b – Estágio 2, pequeno volume de veículos no trecho AB.

Fonte: Manual de Semáforos

No primeiro estágio o fluxo de veículos que passam pelo cruzamento A em direção ao cruzamento B é grande. No segundo estágio apenas as conversões à direita alcançam o semáforo 2, em um fluxo sensivelmente menor. Este comportamento está representando graficamente na Figura 4.2.

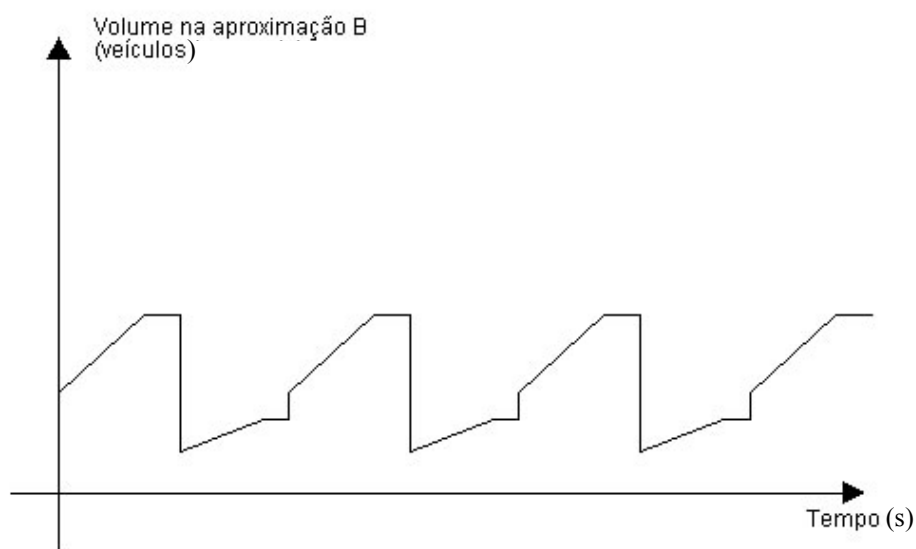


Figura 4.2 – Variação do volume de veículos em B.

Fonte: Manual de Semáforos

Portanto o volume de tráfego que chega à segunda interseção varia ciclicamente em proporções altas e baixas, dependendo do estágio do semáforo 1.

Sincronizando o semáforo 2 com o semáforo 1 é possível reduzir o número de paradas e o atraso total no cruzamento B. Isso é feito estabelecendo entre ambos uma defasagem tal que quando o fluxo maior de veículos proveniente de A alcançar B encontre a indicação luminosa verde.

Quanto menor for a distância entre os semáforos, maior é a importância do sincronismo, pois sua ausência permitirá que o semáforo 1 indique verde enquanto o semáforo 2 indique vermelho, causando o bloqueio do cruzamento e diminuindo a capacidade de fluxo neste trecho, a exemplo da sequência ilustradas pelas Figuras 4.3a, 4.3b e 4.3c.

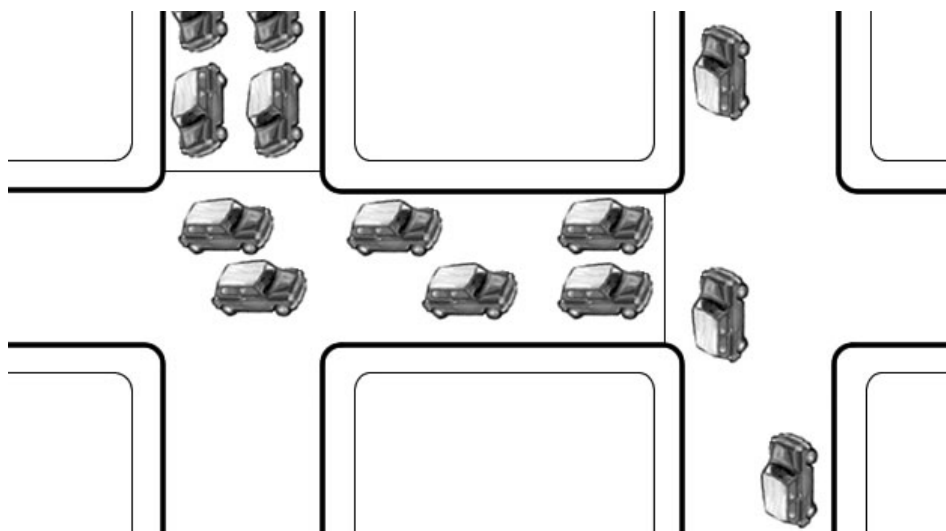


Figura 4.3a – Proibição de passagem da via principal (via horizontal).

Fonte: Manual de Semáforos

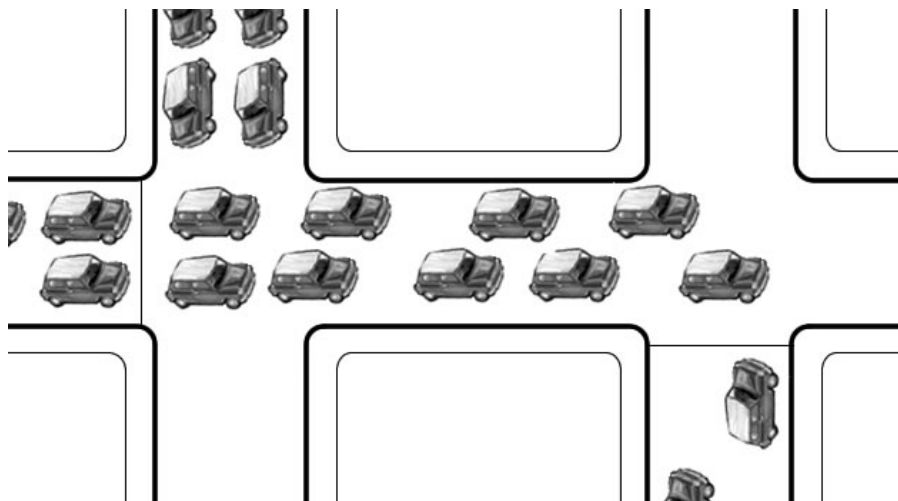


Figura 4.3b – Permissão de passagem não sincronizada, via secundária (via vertical) bloqueada.

Fonte: Manual de Semáforos

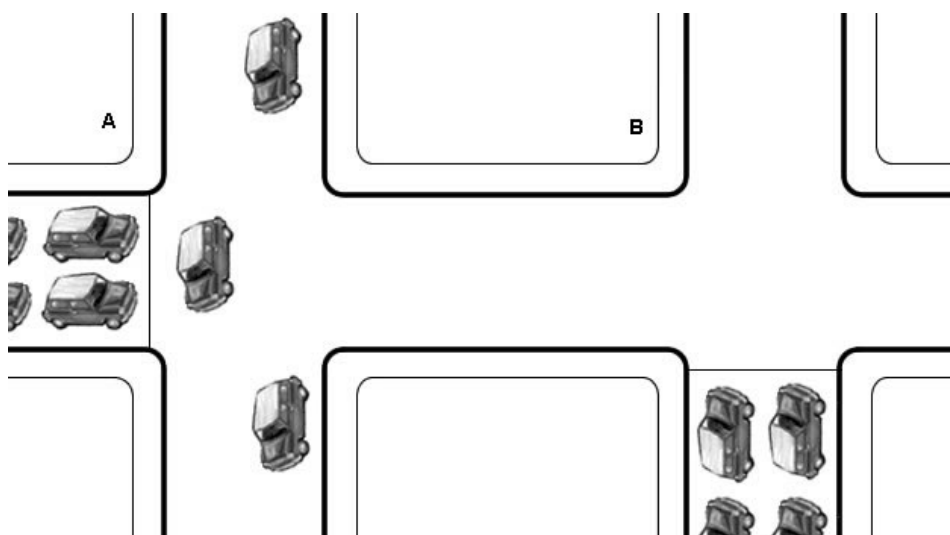


Figura 4.3c – Via principal (via horizontal) com permissão de passagem na interseção B, porém proibição de passagem na interseção A, gerando um desperdício de capacidade.

Fonte: Manual de Semáforos

Os benefícios da sincronização de semáforos são inversamente proporcionais à distância entre os semáforos, já que o fluxo que inicialmente sai em pelotão tende a se homogeneizar durante o percurso.

Caso um semáforo se encontre muito distante de seu adjacente, este poderá ser considerado um semáforo isolado e não haverá necessidade de sincronização.

4.2 Programação de Planos de Tráfego

O volume de veículos que passam por uma interseção varia ao longo do dia e da semana. Com isso é necessário variar os planos de controle de tráfego para que haja um controle eficiente do trânsito. Essa flexibilidade é atingida se o tempo de ciclo, porcentagem dos tempos de verde de cada fase e defasagem forem variáveis permissíveis a alterações por parte do controlador de tráfego.

4.2.1 Tempo de Ciclo

Volumes maiores de veículos, que ocorrem nos horários de pico, necessitam de ciclos maiores por parte do semáforo para aumentar a capacidade de fluxo e evitar congestionamentos. Porém, fora do horário de maior volume é possível utilizar ciclos menores.

Se o controlador não possuir tal recurso, será necessário dimensioná-lo para a pior situação de tráfego. E fora de pico o tempo de verde seria demasiadamente grande e desnecessário, podendo causar um atraso maior que aquele que se obteria caso o tempo de ciclo fosse adequado a menor demanda.

4.2.2 Porcentagem de Tempos de Verde de Cada Fase

As diferentes aproximações de um cruzamento podem apresentar proporções de volumes de tráfego diferentes ao longo do dia, conforme representado pelas Figuras 4.5a e 4.5b.

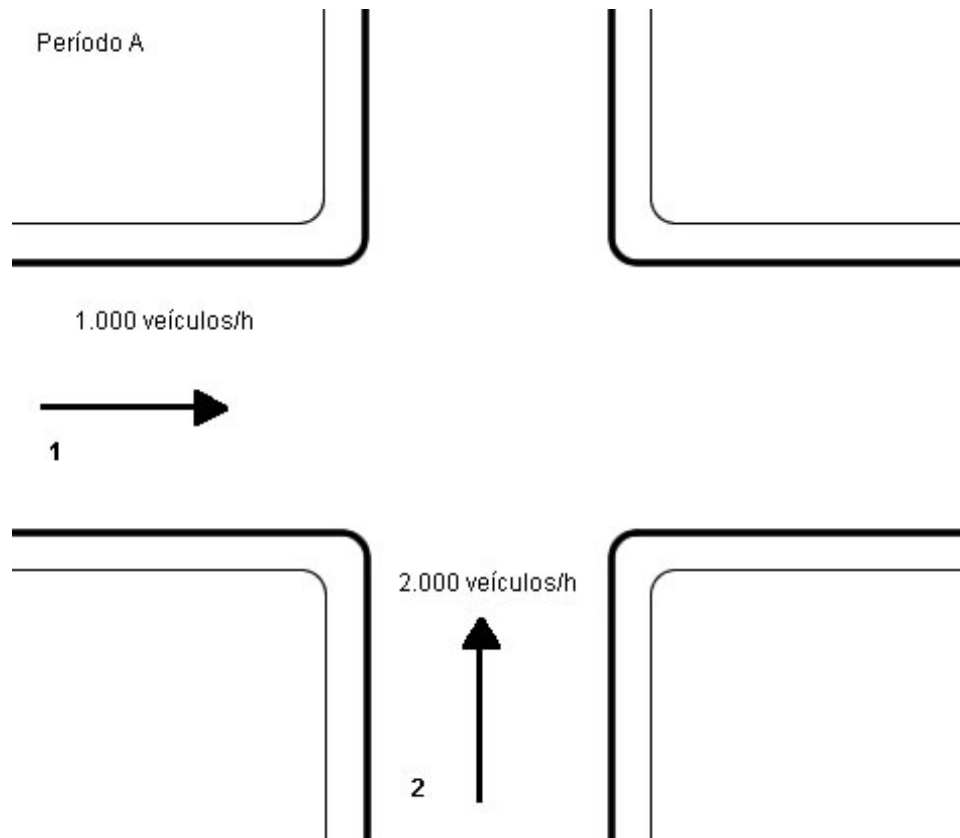


Figura 4.4a – Diferenças na proporcionalidade de volume, período A.

Fonte: Manual de Semáforos

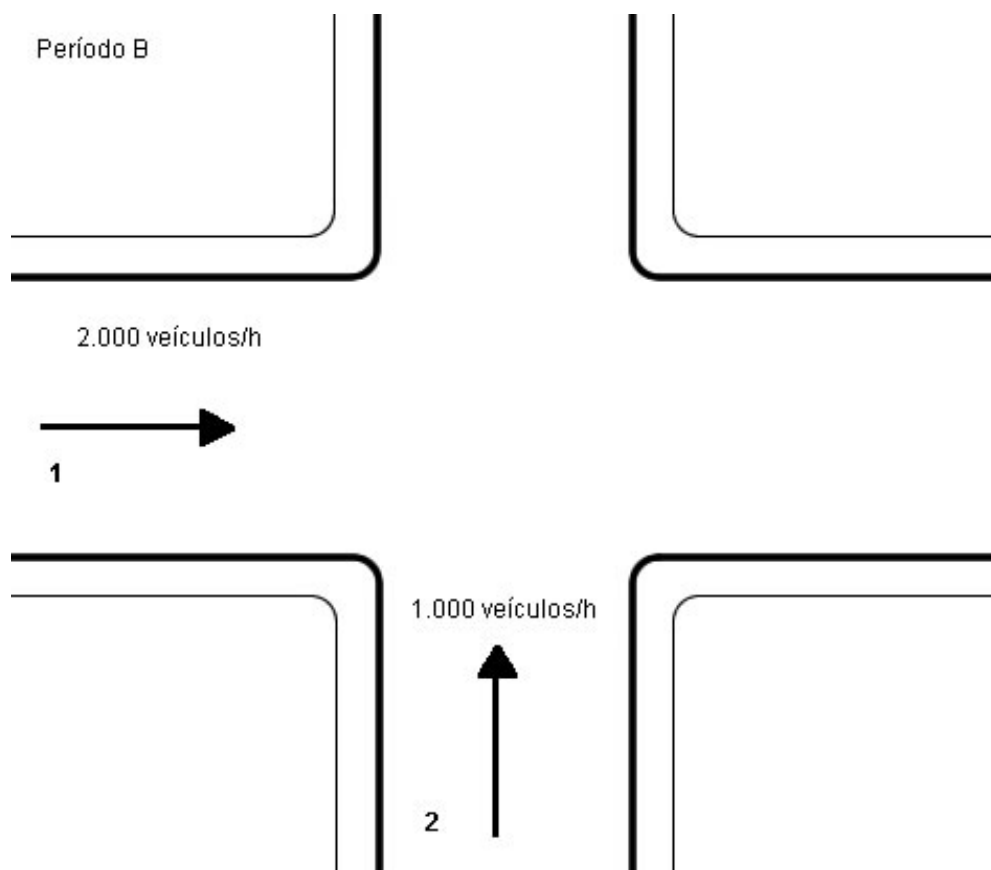


Figura 4.4b – Diferenças na proporcionalidade de volume, período B.

Fonte: Manual de Semáforos

No exemplo acima ocorre uma variação no volume das aproximações 1 e 2, de 1:2 para 2:1. Neste caso, se o controlador de tráfego dispuser de porcentagem de verde variável, poder-se-ia configurar o controlador para, durante o período A, reservar mais tempo de verde para a aproximação 2 e durante o período B reservar mais tempo para a aproximação 1.

Se o controlador de tráfego utilizado tivesse capacidade para apenas um único programa, a melhor solução seria definir tempos iguais de verde para ambas as aproximações.

4.2.3 Defasagem

Em ruas de mão dupla, a exemplo da Figura 4.6, pode não ser possível adotar uma defasagem ótima para ambos os sentidos, pois o que pode ser bom para um sentido atrapalha o seu inverso.

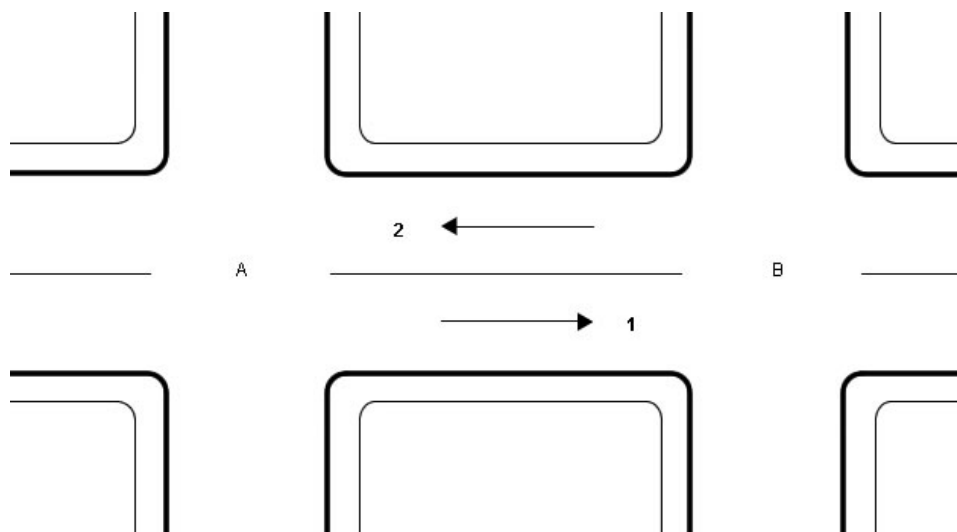


Figura 4.5 – Via de mão dupla.

Fonte: Manual de Semáforos

A solução mais viável nestes casos é escolher uma defasagem que favoreça o sentido de maior movimento. Frequentemente os volumes nos sentidos 1 e 2 não mantêm alguma proporcionalidade.

Se a Tabela 4.1 for considerada para este caso, seria necessário ajustar a defasagem para favorecer o sentido 1 pela manhã e reajustá-la para favorecer o sentido 2 durante a tarde.

Tabela 4.1 – Volume de veículos nos horários de pico em uma via de mão dupla.

Sentido	Pico da Manhã (veículos/h)	Pico da Tarde (veículos/h)
1	2.000	700
2	800	2.150

4.3 Estratégias de Controle Comutáveis

É certo que o volume de tráfego sofre variações durante o dia. E para atender essas variações existem três sistemas básicos de operar um cruzamento: sistemas com planos de tráfego que variam segundo a hora do dia, sistemas com variação segundo o tráfego e sistema centralizado por computador.

4.3.1 Sistemas com planos de tráfego que variam segundo a hora do dia

De forma geral, o tráfego se comporta de maneira cíclica, com o volume se repetindo na mesma hora nos diferentes dias da semana. Este comportamento está graficamente representando na Figura 4.6.

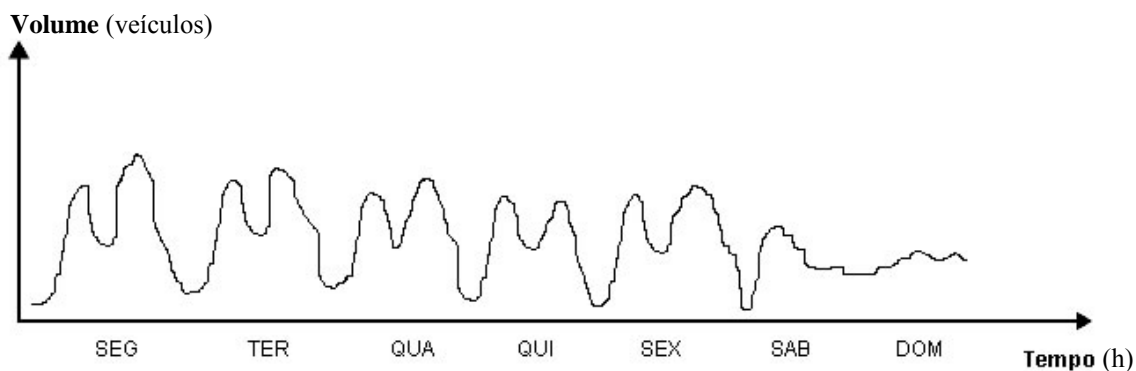


Figura 4.6 – Gráfico do volume de tráfego diário.

Fonte: Manual de Semáforos

Com base nessas informações, alguns equipamentos permitem que os planos de tráfego mudem conforme a hora do dia. Esses equipamentos armazenam de três a nove planos distintos e comuta-os automaticamente.

Normalmente três planos são suficientes para o bom controle do tráfego.

Tabela 4.2 – Volume de veículos por faixa de horário.

Horário	Volume (veículos/h)
0 – 2	400
2 – 4	100
4 – 6	50
6 – 8	1.000
8 – 10	1.200
10 – 12	700
12 – 14	900
14 – 16	500
16 – 18	400
18 – 20	1.100
20 – 22	700
23 – 0	300

No exemplo acima, se for utilizado três planos, ter-se-ia os valores da Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Distribuição de planos.

Plano	Volumes	Horários
1	800 – 1.300	6 – 10, 12 – 14, 18 – 20
2	500 – 700	10 – 12, 16 – 20, 20 – 22
3	0 – 400	16 – 18, 22 – 24, 0 – 6

4.3.2 Sistemas com variação segundo o tráfego

Também conhecido como sistemas atuados, são utilizados em interseções onde o tráfego não tem um comportamento cíclico ou quando o volume de tráfego é baixo, apresentando grandes variações, dada a natureza aleatória do tráfego.

Este sistema utiliza a detecção de veículos para fazer medições e variar automaticamente a programação. Existem dois tipos de sistema atuados: semáforos isolados e rede de semáforos.

Quando um semáforo é isolado não existe a necessidade de manter uma coordenação com os demais semáforos, sendo assim, não há a obrigatoriedade de manutenção de um ciclo constante. Portanto os tempos de verde podem variar de acordo com a demanda de veículos. Para tanto, pode-se utilizar um semáforo totalmente atuado ou semi-atuado.

Quando o volume de tráfego for razoavelmente grande em todas as aproximações, a melhor política de operação, com o objetivo de minimizar ao máximo os atrasos e as paradas no cruzamento, será escoar por completo uma fila de uma aproximação e, em seguida, conceder permissão para outra aproximação até que sua fila desmanche.

Isto é possível utilizando um controlador de tráfego que possua sensores a uma distância de até 50m do cruzamento em cada aproximação. O sensor é ativado cada vez que passa um veículo, e quando ocorrer um intervalo de tempo superior a um valor pré-estabelecido sem que o detector acuse a passagem de um veículo, admite-se que a fila acabou e processa-se a mudança para o estágio seguinte.

Porém, se apenas a via principal possuir um grande fluxo de veículos o sensor deverá ser instalado somente na via secundária, já que sempre haverá tráfego passante na avenida primária. Neste tipo de arranjo, o semáforo sempre indica verde na avenida principal até que sejam detectados veículos na via secundária, quando então esta recebe verde.

Este tipo de configuração é recomendado quando o volume da via secundária não passa de cinquenta a cem veículos por hora e a largura e o volume da via principal impede o cruzamento de veículos em segurança.

Quando um grupo de semáforos está sincronizado a atuação e alteração dos tempos de estágio se tornam mais complexas, pois é necessário manter o sincronismo para não prejudicar o rendimento do sistema.

O procedimento adotado nestes casos é medir o fluxo de veículos em um certo intervalo de tempo nas aproximações mais importantes e escolher um plano dentre vários planos disponíveis no controlador.

4.3.3 Sistema Centralizado de Controle por Computador

Neste sistema os sensores e os controladores estão ligados em um computador instalado em um centro de controle. Alguns sistemas possuem, ainda, câmeras instaladas nos principais locais a serem controlados.

Este sistema não introduz nenhum novo método de controle, apenas permite realizar algumas ações em tempo mínimo e facilita uma série de tarefas, relacionadas a seguir:

- Controle de falhas do sistema: uma mensagem de defeito no sistema pode apresentar-se para o operador no painel principal logo que o equipamento enfrente algum problema. Assim é possível corrigi-lo rapidamente de modo remoto ou acionando uma equipe de reparos;
- Flexibilidade e facilidade de mudança de planos de tráfego: dispondo de uma central e da versatilidade dos computadores, pode-se cadastrar inúmeros planos de tráfego distintos e alternar entre ele com uma frequência quase

ilimitada, seja através de uma tabela de horários, dias da semana e feriados, ou mediante valores informados pelos sensores;

- Facilidade de supervisão pelo operador do sistema: dispondo dos dados informados pelos sensores e por câmeras de televisão, o operador pode constatar os fatos anormais que estão ocorrendo e ordenar medidas corretivas.

CAPÍTULO 5 – REGULAGEM DE SEMÁFOROS ISOLADOS

A fluidez do tráfego e sua segurança estão diretamente associadas à regulação dos semáforos existente na rede viária.

Segundo o manual dos semáforos, regular um semáforo significa:

- Determinar o tempo de ciclo ótimo de interseção;
- Calcular os tempos de verde necessários para cada fase;
- Calcular as defasagens entre os semáforos adjacentes, se necessário.

Portanto, regular um semáforo é desenvolver planos de tráfego que efetuem o melhor controle possível baseado em um critério estabelecido, como por exemplo, o mínimo atraso de veículos.

Dentre vários métodos de cálculos para regulação de semáforos, o método mais utilizado no Brasil para tal fim é um método de divisão proporcional conhecido por Método de Webster, que tem o nome de seu criador, Daniel Webster (1782 – 1852), e foi inicialmente proposto para regulação de semáforos no livro *Traffic Signals*.

5.1 Capacidade e Fluxo de Saturação

“A capacidade de uma aproximação sinalizada é definida como sendo o número máximo de veículos capazes de atravessar um cruzamento” (Manual de Semáforos, 1984, pág. 62).

Com base neste conceito, assume-se que a taxa de escoamento que passa pelo semáforo é a máxima possível, ou seja, é igual ao fluxo de saturação. A capacidade de uma via interrompida por um semáforo é determinada pelo fluxo de saturação e pelo tempo de verde oferecido pelo semáforo. [Leite, Engenharia de Tráfego, 1980]

No início do tempo de verde os veículos levam algum tempo para iniciar o movimento e atingir a velocidade normal de operação. Este tempo inicial é denominado de atraso inicial. Nesse período inicial a taxa de escoamento de veículos é baixa e, à medida que o tempo passa, vai aumentando até atingir o valor máximo ou, simplesmente, o fluxo de saturação. Quando o tempo de verde termina e se inicia o amarelo, o fluxo de saturação ainda permanece por alguns poucos segundos até decair a zero. O período de verde da fase seguinte se inicia e um comportamento semelhante ocorre. Este comportamento pode ser visto graficamente na Figura 5.1.

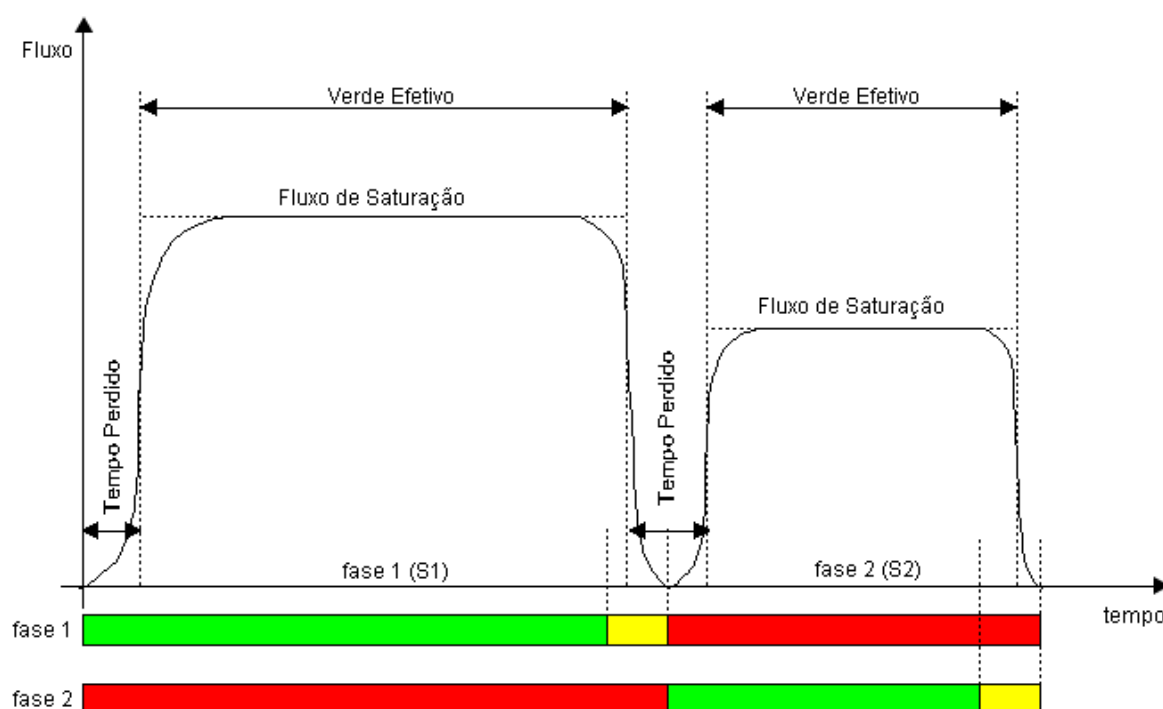


Figura 5.1 – Taxa de descarga da fila em períodos verdes totalmente saturados.

Fonte: Manual de Semáforos

O Manual de Semáforos define o fluxo de saturação:

“O fluxo de saturação é definido como sendo o fluxo que seria obtido se houvesse uma fila de veículos na aproximação e a ela fossem dados 100% de tempo de verde do cruzamento (escoamento ininterrupto). Normalmente, o fluxo de saturação é expresso em unidade de veículos/hora de tempo verde (veíc./htv).”

Portanto é evidente que o tempo de verde disponível não é igual ao tempo de verde utilizado. Existe uma perda no início do tempo e um ganho ao final, com o tempo de amarelo. Assim, o tempo total de permissão de passagem pode ser decomposto em dois períodos: período de verde efetivo, no qual ocorre o escoamento de veículos, e o período de tempo perdido, durante o qual não há travessia de veículos. Desta forma, conclui-se que a capacidade de escoamento de uma aproximação sinalizada é diretamente proporcional ao tempo de verde efetivo.

A capacidade de uma aproximação (em veículos por hora) e o verde efetivo (em segundos) podem ser calculados da seguinte forma:

$$capacidade = S \frac{g_{ef}}{C} \quad (5.1)$$

sendo:

$$g_{ef} = g + t_a - I \quad (5.2)$$

onde:

g = tempo de verde normal (segundos);

t_a = tempo de amarelo (segundos);

g_{ef} = tempo de verde efetivo (segundos);

C = tempo de ciclo (segundos);

I = tempo perdido (segundos);

S = fluxo de saturação (veic./htv).

5.2 Estimativa do Fluxo de Saturação e Tempo Perdido

O dimensionamento do tempo de verde depende do conhecimento dos valores de fluxo de saturação das aproximações e do tempo perdido no início e fim do período de verde de cada fase. [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]

O recomendável é que os valores de fluxo de saturação e tempo perdido sejam obtidos *in loco* sempre que possível. Porém, não sendo possível realizar o levantamento devido ao projeto estar associado a uma nova interseção ou a modificações geométricas em uma interseção existente, pode-se estimar esses valores através de fórmulas que foram deduzidas a partir do estudo das interseções.

5.2.1 Fluxo de Saturação

Vários são os fatores que influenciam no fluxo de saturação, dentre os mais influentes tem-se a geometria da interseção (principalmente o diâmetro da via), número de veículos que fazem conversão à direita e à esquerda, declividade da via, estacionamento de veículos e presença de grandes veículos (ônibus e caminhões).

Para aproximações sem veículos estacionados, sem conversão à esquerda e até 10% dos carros realizarem conversões à direita, o fluxo de saturação pode ser estimado segundo a equação 5.3:

$$S = 525 \cdot L \quad (5.3)$$

onde:

S = fluxo de saturação em veículos equivalentes por hora de tempo de verde (V_{eq}/htv);

L = largura da aproximação, em metros (m).

5.2.2 Tempo Perdido

Os veículos podem atravessar o cruzamento durante o período de amarelo, desde que observado as condições de segurança. Portanto o tempo total disponível para o escoamento do tráfego em uma aproximação estende-se desde o início do tempo de verde ao fim do tempo de amarelo. Mas devido à reação e aceleração no início do período verde (denominado atrasos iniciais) e a redução de fluxo (desaceleração no período de amarelo), o tempo total disponível não é aproveitado.

Esse tempo perdido é a diferença entre o período de verde efetivo com a soma dos tempos de verde e amarelo.

Assim,

$$I = (g + t_a) - g_{ef} \quad (5.4)$$

onde:

I = tempo perdido, em segundos (s);

g = tempo de verde normal (s);

t_a = tempo de amarelo (s);

g_{ef} = tempo de verde efetivo.

Para evitar tempos longos de amarelo e desrespeito dos motoristas, é recomendado colocar além do tempo de amarelo, dois ou três segundos de vermelho coincidentes com o vermelho de outras fases do cruzamento. Este procedimento é denominado de vermelho geral. [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]

No caso de haver vermelho geral, este será considerado como tempo perdido, e a expressão para calcular o tempo total perdido é dada por:

$$T_p = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{i=1}^n (I - t_{a_i}) \quad (5.5)$$

onde:

T_p = tempo perdido total por ciclo (s);

I = período de vermelho geral (s);

I_i = tempo perdido da fase i (s);

t_{a_i} = tempo de amarelo da fase i (s).

Não havendo possibilidades de levantamento dos dados necessários para os cálculos mencionados acima, a CET de São Paulo orienta utilizar como tempo perdido total a soma dos tempos de amarelo. Porém esse método não é aconselhado pelo Manual de Semáforos em interseções que possuam um grande tráfego de veículos pesados, geometria complexa ou grande distância para percorrer o cruzamento.

5.3 Planos de Tráfego para Interseções Isoladas

A determinação do tempo de ciclo deve ser feita de forma a causar o menor atraso possível à interseção como um todo e os tempos de verde devem ser divididos proporcionalmente em relação às suas taxas de ocupação.

5.3.1 Taxa de Ocupação e Grau de Saturação de uma Aproximação

“A taxa de ocupação de uma aproximação é definida com sendo a relação entre a demanda de tráfego e o fluxo de saturação.” (Manual de Semáforos, 1984, pág. 66)

A taxa de ocupação é uma medida absoluta da solicitação de tráfego em uma aproximação e é calculada da seguinte forma:

$$y_i = \frac{q_i}{S_i} \quad (5.6)$$

onde:

y_i = taxa de ocupação da aproximação i ;

q_i = demanda da aproximação i (V_{eq}/h);

S_i = fluxo de saturação da aproximação i (V_{eq}/htv).

O grau de saturação é uma medida resultante da relação entre a demanda de tráfego e a capacidade de atendimento de uma aproximação, e está intimamente ligada com a taxa de ocupação:

$$X_i = \frac{q_i}{\text{capacidade}}$$

$$X_i = \frac{q_i}{S_i \frac{g_{ef}}{C}}$$

Portanto,

$$X_i = y_i \frac{C}{g_{ef}} \quad (5.7)$$

onde:

X_i = grau de saturação da aproximação;

g_{ef} = tempo de verde efetivo da fase associada ao movimento da aproximação (segundos);

C = tempo de ciclo do cruzamento (segundos).

O grau de saturação é um coeficiente que indica o quanto a demanda está próxima da capacidade de escoamento de veículos de uma aproximação. Alterando-se a proporção do verde dedicado de uma aproximação, acarretará na modificação do grau de saturação.

O grau de saturação é sempre maior que a taxa de ocupação, já que o tempo de ciclo é sempre maior que o período de verde efetivo de uma fase.

Pode-se levar em consideração o seguinte exemplo de uma situação hipotética para demonstrar os conceitos apresentados: tem-se uma aproximação com volume horário igual a 2.000 V_{eq}/h e um fluxo de saturação de 4.000 V_{eq}/htv . Supondo um tempo de ciclo de 40 segundos e o tempo de verde efetivo igual a 24 segundos tem-se: [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]

$$y = \frac{2000}{4000} = 0,5$$

$$\text{Porcentagem de verde efetivo} = \frac{24}{40} = 0,6$$

$$X = \frac{0,5}{0,6} = 0,83$$

Deste modo, a taxa de ocupação y é igual a 0,5. Isto significa que a solicitação da aproximação é a metade da sua capacidade máxima de atendimento. Utilizando o tempo de verde efetivo de 24 segundos, a capacidade de atendimento da aproximação reduz em 40%, o que resulta em uma taxa de ocupação relativa (grau de saturação) de 83%.

5.3.2 Tempo de Ciclo Mínimo

Em uma aproximação os veículos somente possuem permissão para passagem durante o período de verde da fase associada ao seu movimento. Para não permitir que veículos acumulem-se de um ciclo para o outro é necessário que todos os veículos que se apresentem ao longo de um ciclo, sejam escoados no mesmo. Isso significa que:

$$g_{ef} \cdot S_i \geq q_i \cdot C \quad (5.8)$$

Caso ambos os lados da equação forem iguais, tem-se a situação limite, o qual o tempo de verde efetivo é suficiente para escoar exatamente a demanda ocorrida no ciclo. Esta situação está ilustrada na Figura 5.2.

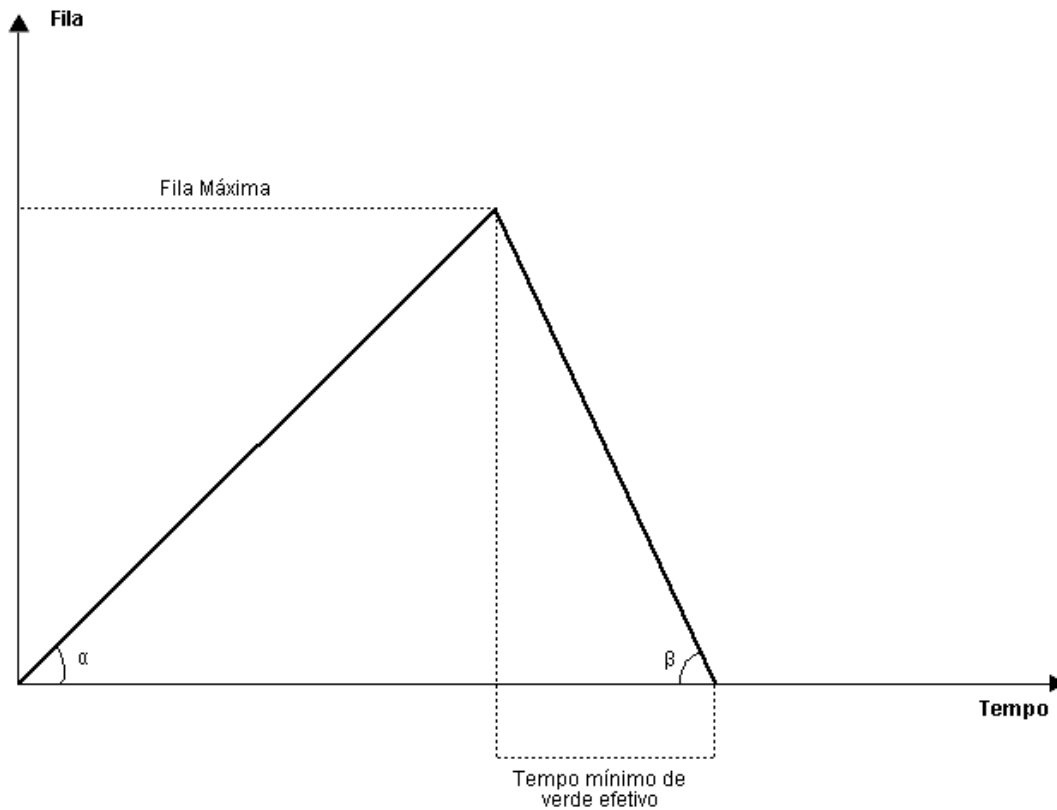


Figura 5.2 – Formação e extinção da fila em uma aproximação e tempo mínimo de verde efetivo.

Fonte: Manual de Semáforos

Durante o período de verde é possível haver movimentos em mais de uma aproximação. Nestes casos o tempo de verde mínimo da fase é calculado com base na aproximação de maior demanda (taxa de aproximação crítica), e esta é denominada de aproximação crítica.

O tempo do ciclo é igual à soma do verde efetivo com o tempo perdido total de cada fase, portanto:

$$C_{\min} = T_p + \sum_{i=1}^{n_{\min}} g_{ef} \quad (5.9)$$

ou

$$C_{\min} = \frac{T_p}{1 - Y} \quad (5.10)$$

onde:

$\sum_{i=1}^{n_{\min}} g_{ef}$ = somatório dos tempos de verde mínimo de cada fase do cruzamento.

T_p = tempo perdido total (segundos)

$Y = \sum_{i=1}^n y$ = somatório das taxas de ocupação de cada fase do cruzamento.

No ciclo mínimo o tempo de verde efetivo é suficiente para escoar apenas os veículos que chegam durante o ciclo.

5.3.3 Tempo de Ciclo Ótimo

Utilizar o ciclo mínimo significa supor que a demanda seja sempre constante, o que não ocorre na prática, pois o tráfego de veículos é um processo aleatório, gerando uma variação, em torno de um valor médio, nos fluxos de chegada e escoamento.

Caso o grau de saturação ultrapassar o valor 1 (número de veículos maior que a capacidade máxima de escoamento), origina-se uma fila excedente que irá atravessar a interseção no ciclo subsequente. O tempo de retardamento causado pela fila excedente é denominado atraso aleatório.

Não havendo tempo de folga disponível no ciclo, evitará que a fila excedente seja escoada, podendo se tornar cada vez maior e gerando uma situação de congestionamento (atraso aleatório grande).

Entretanto, se houver um tempo de folga, será mais difícil de não ocorrer o escoamento completo da fila formada durante o período de vermelho, e mesmo que isso ocorra, a chance da fila excedente formada ser desfeita no ciclo seguinte é maior.

Portanto, o comprimento e o atraso aleatório de uma fila excedente são inversamente proporcionais ao tempo de folga existente no ciclo.

Em um cruzamento sem tempo de folga (ciclo mínimo), se houver fila excedente sua extensão tenderá ao infinito. Contudo, isso não ocorre na prática, pois os motoristas quando percebem um congestionamento alteram a rota em busca de caminhos alternativos.

Para evitar este problema é necessário que o tempo de ciclo de uma interseção seja sempre maior que o tempo de ciclo mínimo. Caso contrário o equilíbrio demanda/atendimento torna-se instável e qualquer variação do fluxo levará a uma possibilidade potencial de congestionamento.

A Figura 5.3 ilustra a relação entre tempo de ciclo e a taxa de ocupação:

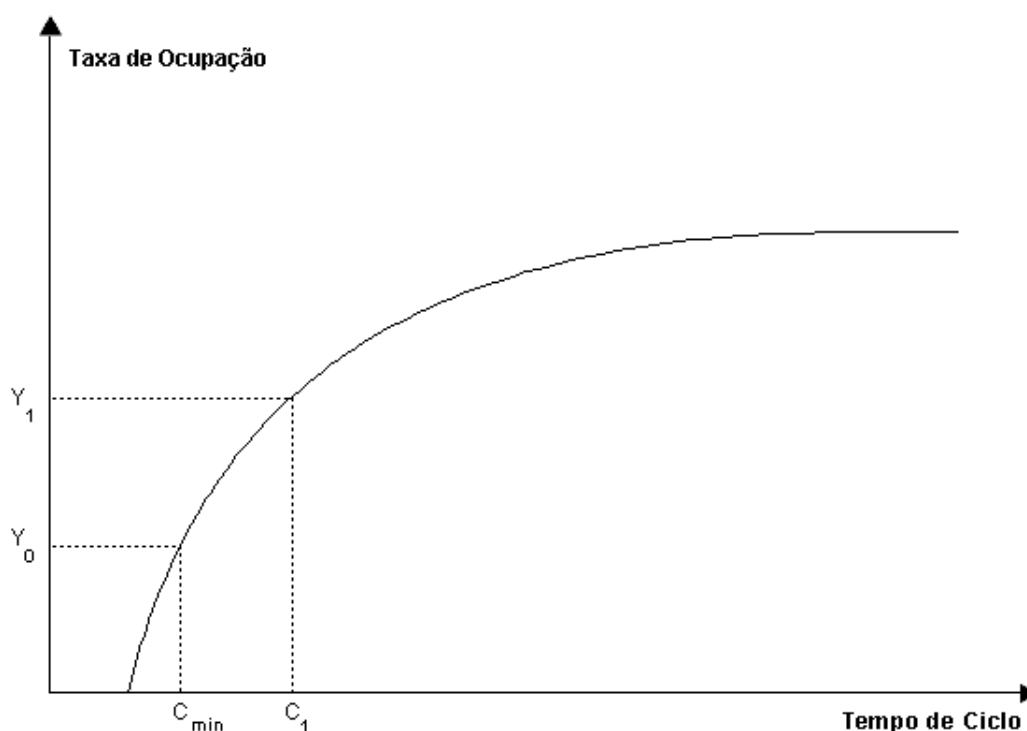


Figura 5.3 – Taxa de ocupação por tempo de ciclo.

Fonte: Manual de Semáforos

Se a taxa de ocupação de uma interseção for Y_0 , o tempo de ciclo será C_{min} . Se o tempo de ciclo for aumentado para C_1 , então a folga criada permitirá que a interseção suporte uma taxa de ocupação até Y_1 .

Se o tempo de ciclo continuar aumentando, chegará a um ponto que o ganho de folga torna-se irrisório, além de aumentar o atraso uniforme gerado por longos períodos de vermelho.

“Define-se o atraso uniforme de uma aproximação como sendo o retardamento sofrido pelos veículos que chegam durante o tempo de vermelho”. (Manual de Semáforos, 1984, pág. 72)

Um gráfico ilustrando o atraso uniforme está representado pela Figura 5.4.

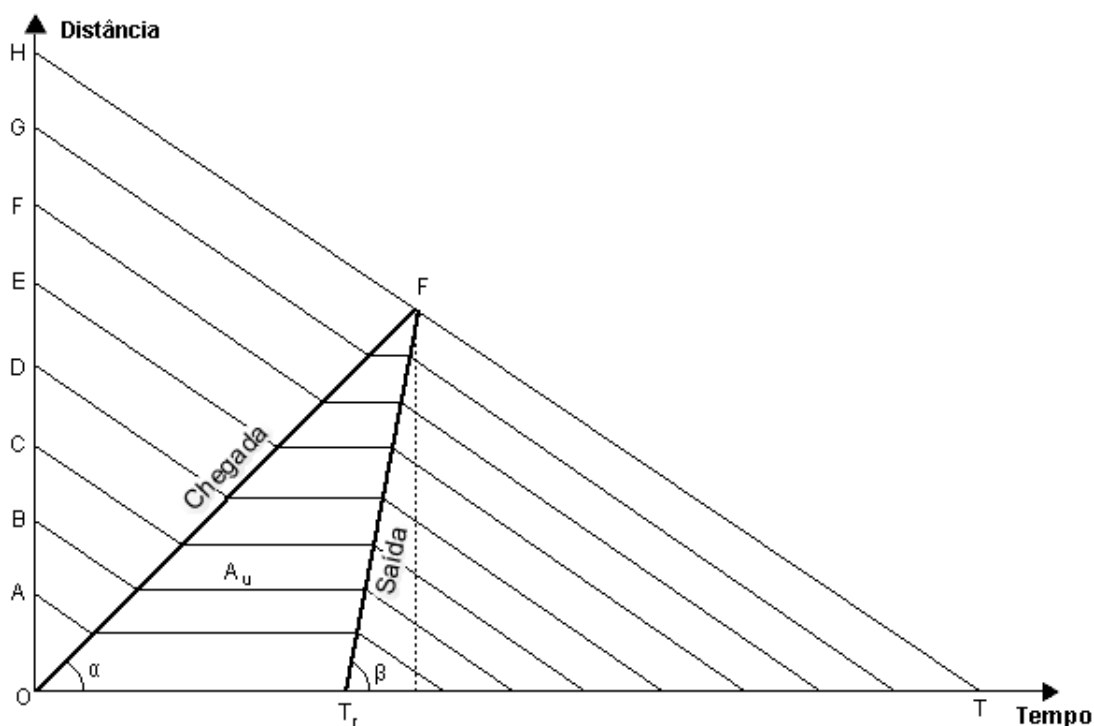


Figura 5.4 – Gráfico do atraso uniforme.

Fonte: Manual de Semáforos

A Figura 5.4 ilustra a trajetória dos veículos A, B, C, D, E, F, G e H que chegam a uma taxa constante durante o período de vermelho dando origem a reta OF, que representa a fila de carros. Ao se iniciar o período de verde (instante T_r) os veículos são escoados na taxa máxima até terminar a fila (instante T).

A área do triângulo OFT_r representa o atraso uniforme. O veículo H não sofre qualquer atraso, já que atravessa o cruzamento sem ser retido.

O atraso total de uma aproximação é composto por duas parcelas, atraso uniforme e atraso aleatório. [DENATRAN, Manual de Semáforos, 1984]

Com base no método de Webster, pode-se enunciar uma fórmula para calcular o atraso médio total sofrido por um veículo:

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda_x)} + \frac{X^2}{2q(1-X)} - 0,65 \left(\frac{c}{q^2} \right)^{1/3} X^{2+5\lambda} \quad (5.11)$$

onde:

d = atraso médio por veículo (segundos);

c = tempo de ciclo (segundos);

λ = relação entre tempo de verde efetivo e tempo de ciclo ($\frac{g_{ef}}{ciclo}$);

X = grau de saturação;

q = demanda (veículos por segundo).

O primeiro termo dessa equação se refere ao atraso uniforme, o segundo termo é o atraso aleatório e o terceiro termo um fator de correção que corresponde a uma correção de 5 a 10%. Portanto, a equação acima pode ser aproximada para:

$$d = 0,9 \left(\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda_x)} + \frac{X^2}{2q(1-X)} \right) \quad (5.12)$$

Sendo o objetivo da regulação de semáforos melhorar o rendimento do cruzamento, ou seja, aumentar a quantidade de veículos atendidos pelas aproximações da interseção, deve-se equilibrar os tempos de ciclo entre os períodos de verde das fases a fim de não prejudicar uma ou mais correntes de tráfego, já que a permissão de passagem em uma determinada aproximação implica em proibição de passagem em uma ou mais aproximações.

O ciclo ótimo pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$C_0 = \frac{1,5 T_p + 5}{1 - Y} \quad (5.13)$$

onde:

C_0 = tempo de ciclo ótimo (segundos);

T_p = tempo total perdido (segundos);

Y = somatório da taxa de ocupação da aproximação crítica de cada fase da interseção.

Apesar de esta equação ser uma aproximação bastante ideal, deve-se tomar alguns cuidados antes de aplicar seus resultados em um cenário real, pois quando o volume de tráfego é baixo, o tempo de ciclo ótimo se tornará pequeno. Para efeitos práticos, e também por razões de segurança, é recomendado adotar como tempo mínimo de ciclo o valor de 30 a 35 segundos.

O atraso total causado ao tráfego é mínimo se o tempo total de verde efetivo do ciclo ótimo for distribuído proporcionalmente às taxas de ocupação crítica (y_{crit}) de cada fase. Considerando uma interseção de duas aproximações, ter-se-ia:

$$\frac{g_{ef1}}{g_{ef2}} = \frac{y_{crit1}}{y_{crit2}} \quad (5.14)$$

onde:

g_{ef1} = tempo de verde efetivo da fase 1 (segundos);

g_{ef2} = tempo de verde efetivo da fase 2 (segundos);

y_{crit1} = taxa de ocupação crítica da fase 1;

y_{crit2} = taxa de ocupação crítica da fase 2.

Pode-se generalizar a equação 5.14 para cruzamentos com mais de duas aproximações:

$$g_{efi} = \frac{y_{criti}}{Y} (C_0 - T_p) \quad (5.15)$$

onde:

g_{efi} = tempo de verde efetivo da fase i (segundos);

y_{criti} = taxa de ocupação crítica da fase i;

Y = somatório das taxas de ocupação crítica das fases do cruzamento;

C_0 = tempo de ciclo ótimo (segundos);

T_p = tempo total perdido no ciclo (segundos);

Portanto, o tempo de verde efetivo total da interseção ($C_0 - T_p$) é dividido proporcionalmente entre as fases, na razão com que suas taxas críticas de ocupação estão para com a taxa de ocupação total da interseção.

De posse do valor de verde efetivo de cada fase, pode-se calcular o tempo de verde real:

$$g_i = g_{efi} + I_i - t_{ai} \quad (5.16)$$

onde:

g_i = duração do período de verde real da fase i (segundos);

g_{efi} = tempo de verde efetivo da fase i (segundos);

I_i = tempo perdido na fase i (segundos);

t_{ai} = tempo de amarelo da fase i (segundos);

5.3.4 Procedimento Prático para Dimensionamento dos Tempos de um Semáforo Isolado

O Manual de Semáforos define onze etapas a serem seguidas para elaborar um plano de tráfego para um semáforo isolado:

1. Obter o fluxo de saturação das aproximações;
2. Ajustar o fluxo de saturação a fim de prever agentes causadores de congestionamento, como veículos comerciais, diminuição da largura da via por causa de estacionamentos, má visibilidade, entre outros;
3. Determinar a demanda por horário;
4. Determinar o número de fases;
5. Calcular as taxas de ocupação y_i de cada aproximação, escolhendo aquela de maior valor (ocupação crítica);
6. Calcular o valor de Y (somatória das taxas de ocupação);
7. Obter o tempo total perdido. Caso não seja possível, igualar ao tempo de amarelo;
8. Calcular o tempo total perdido (T_p) durante o ciclo;
9. Determinar o tempo de ciclo ótimo para a interseção;
10. Determinar os tempos de verde efetivo de cada fase;
11. Determinar os tempos de verde real de cada fase.

5.4 Análise de Desempenho de uma Interseção Sinalizada

A análise de desempenho de uma interseção sinalizada é uma poderosa ferramenta de controle e um ótimo indicador de mudanças necessárias na concepção dos planos de tráfego.

Abaixo estão numeradas algumas relações consideradas úteis e citadas pelo Manual de Semáforos:

- a) Proporção de veículos detidos: indicam a porcentagem do total de veículos que param na aproximação:

$$p = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} \quad (5.17)$$

onde:

p = proporção de veículos detidos (%);

λ = relação entre o tempo de verde efetivo da fase associada e o tempo de ciclo (g_{ef}/C).

- b) Comprimento Médio da Fila: estimativa da extensão da fila de veículos:

$$N = q \left(\frac{r}{2} + d \right) \quad (5.18)$$

onde:

N = fila média (veículos);

q = fluxo de veículos (veículos / segundo);

r = tempo de vermelho efetivo (segundos);

d = atraso médio por veículo (segundos).

c) Atraso médio por veículo: dado pela equação simplificada de Webster:

$$d = c \cdot A + \frac{B}{q} - C_p \quad (5.19)$$

onde:

d = atraso médio por veículo (segundos);

c = tempo de ciclo (segundos);

$$A = \frac{(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda_x)} ;$$

$$B = \frac{x^2}{2(1 - x)} ;$$

λ = relação entre o tempo de verde efetivo da fase e o tempo de ciclo;

x = grau de saturação da aproximação;

C_p = porcentagem de correção dos dois primeiros termos.

d) Grau de Saturação: indica a proximidade da demanda com a capacidade horária da aproximação. Considerado um excelente indicador de qualidade de atendimento de uma interseção. O grau de saturação é dado por:

$$X_0 = \frac{2Y}{1 + Y} \quad (5.20)$$

onde:

X_0 = grau de saturação sob condições ótimas;

Y = somatória das taxas de ocupação crítica de cada fase do cruzamento.

CAPÍTULO 6 – IMPLEMENTAÇÃO

Foi construído um protótipo de controlador de tráfego totalmente atuado e capacitado de tomar algumas decisões. O controlador de semáforo foi feito com um microcontrolador PIC16F72 da Microchip®, que pode ser visualizado na Figura 6.1.



Figura 6.1 – PIC16F72.

Os sensores detectores de veículos foram construídos com LEDs infravermelho (emissor) e fotossensores (receptor) montados em uma base de madeira com três furos de 5mm, sendo os dois externos para colocação dos LEDs e o interno para fixação do fotossensor, conforme ilustrado na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Sensor de presença.

O programa do microcontrolador foi feito em assembler, utilizando como ambiente de programação o software MPLAB[®] IDE (versão 7.40), cuja distribuição ocorre de forma gratuita pelo próprio fabricante do PIC. Sua interface de programação pode ser visualizada na Figura 6.3.

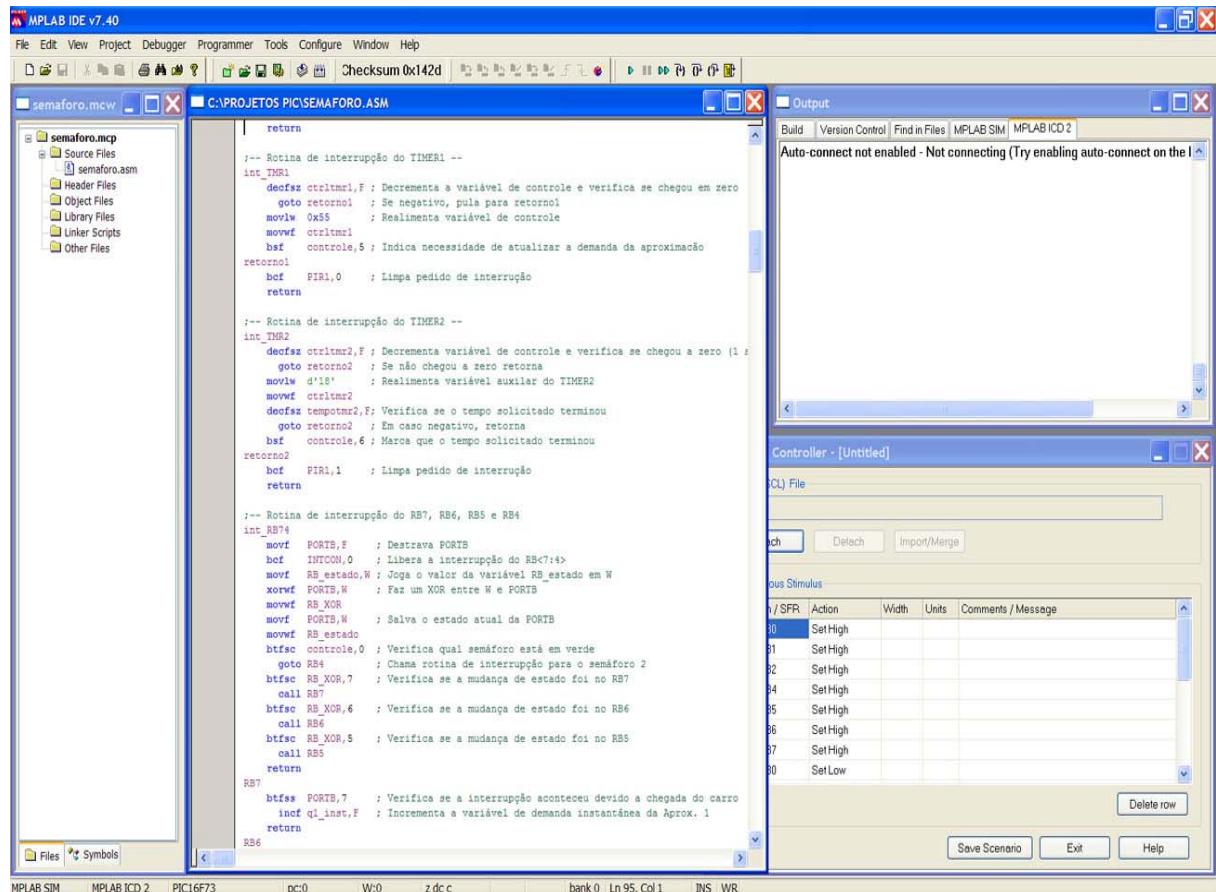


Figura 6.3 – Interface do MPLAB[®].

Para programar o microcontrolador foi utilizado o programador ICD2^{BR}, o qual está ilustrado na Figura 6.4.

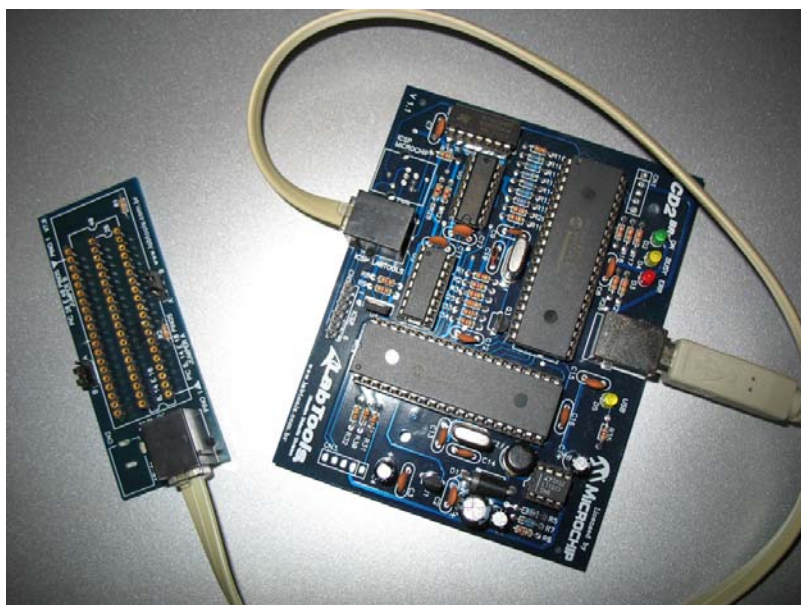


Figura 6.4 – Programador ICD2^{BR}.

6.1 Sensor Infravermelho de Presença

O princípio do sensor infravermelho detector de presença é emitir um feixe infravermelho que será rebatido na presença de um objeto e será captado pelo fotossensor. Para tanto, é necessário que o emissor e o receptor estejam dispostos lado a lado.

O sensor infravermelho foi escolhido para este trabalho devido a sua simplicidade de implementação e baixo custo. Porém, em uma situação real, seu uso não seria recomendável, já que estaria diretamente sob influência da luz solar, gerando uma grande interferência. Nesta situação os melhores sensores seriam aqueles já utilizados por radares eletrônicos de velocidade (popularmente conhecido como “pardal”), o qual se utiliza do fenômeno natural da indução para detectar os veículos.

Cada sensor é constituído por dois circuitos, ilustrados na Figura 6.5. No primeiro circuito o LED IR é diretamente polarizado e ligado em série com um resistor de 330 Ω . Desta forma o LED está sempre emitindo luz infravermelha, que será captada pelo fotossensor caso um corpo se projete a frente do sensor. O segundo circuito é composto de um fotossensor inversamente polarizado, com seu catodo ligado em paralelo a um resistor de 22 K Ω e a base de um transistor BC548, que funciona como uma porta lógica. Quando o fotossensor receber luz infravermelho irá gerar uma corrente contrária, em relação à

polarização do resistor de $22K\Omega$, fazendo com que a corrente neste segmento tenda a zero, bloqueando a passagem de carga no transistor. Portanto, neste circuito o resistor tem um papel de regulador na sensibilidade do sensor, quanto maior for sua resistência menor será a quantidade de luz incidente no fotossensor para que a corrente elétrica neste segmento tenda a zero.

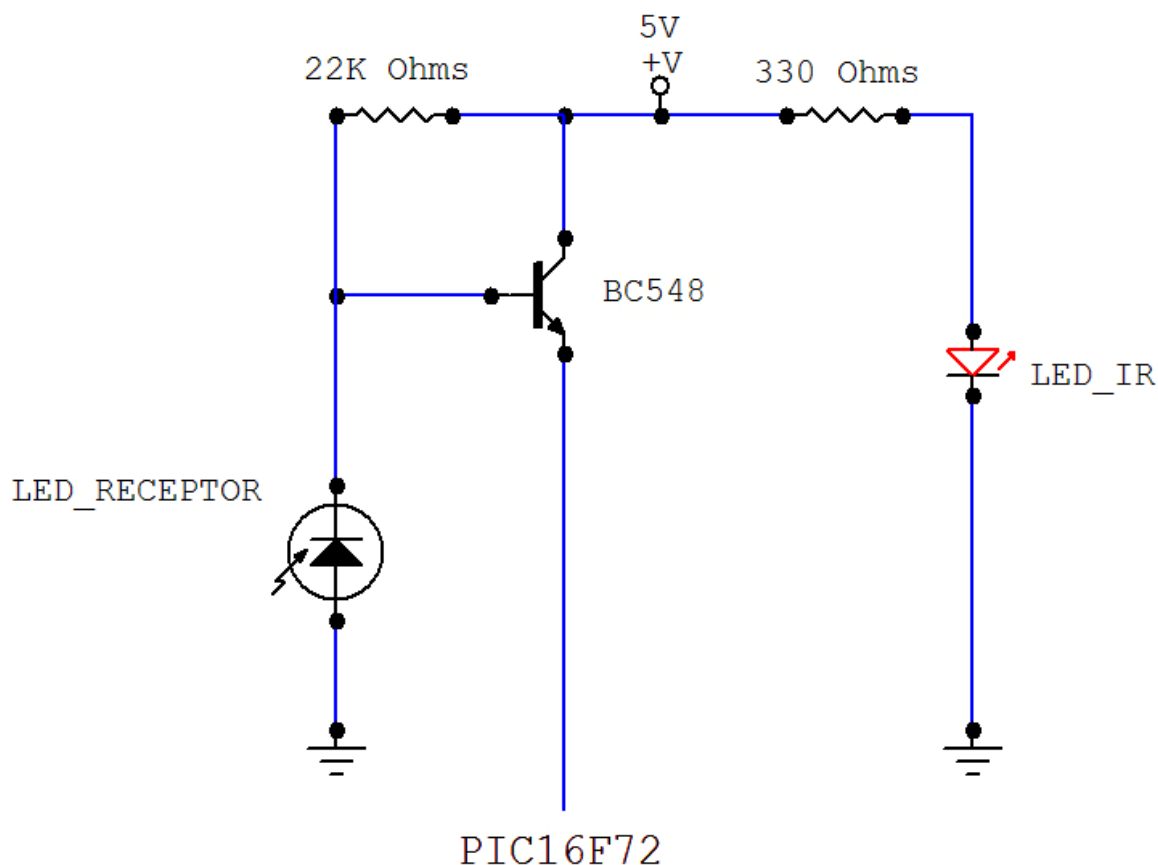


Figura 6.5 – Circuito do sensor de presença.

Foram utilizados quinze sensores, sendo nove sensores na via principal (três faixas por três filas) e seis na via secundária (duas faixas por três filas), conforme ilustrado na Figura 6.6.

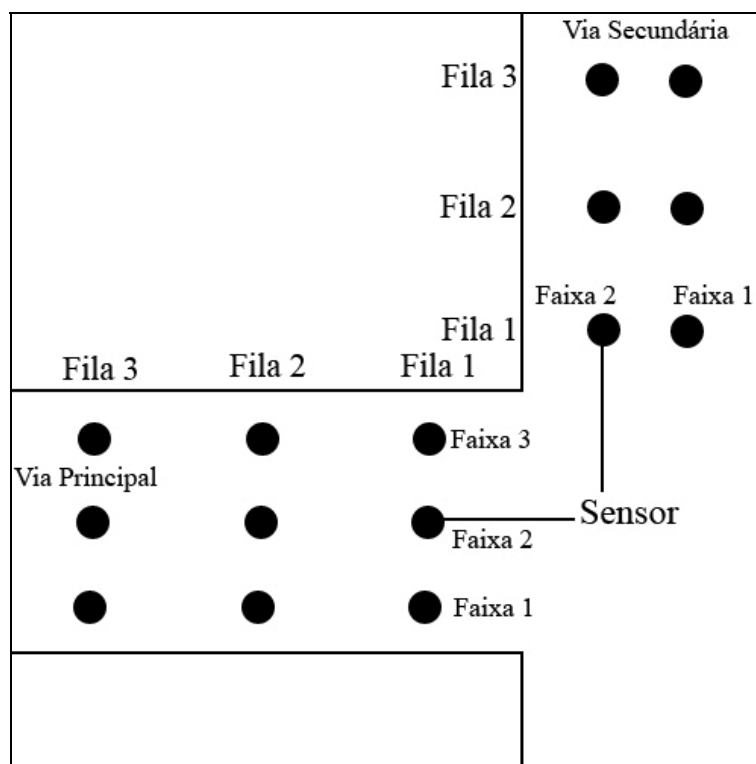


Figura 6.6 – Disposição dos sensores ao longo das aproximações.

Os sensores da terceira fila de cada via são ligados individualmente nos pinos de interrupção externa do microcontrolador, e sua função principal é permitir a contagem de veículos para calcular a demanda instantânea de cada aproximação. O restante dos sensores é ativado quando o semáforo indica o sinal vermelho, e sua função é fazer a contagem de veículos parados (tamanho da fila). Os dados disponibilizados pelos sensores permitem ao microcontrolador tomar a decisão de quanto tempo de sinal verde deverá ser concedido para cada aproximação, dependendo da quantidade de carros que por ali passam e pelo tamanho da fila parada em sinal vermelho.

6.2 Controlador de Semáforo

A comutação das luzes do semáforo é feito pelo microcontrolador e segue algumas normas nacionais:

- Ao ser ligado, as luzes amarelas piscam durante alguns poucos segundos, e então ambas as vias recebem a sinalização vermelha, para então iniciar o verde na via principal;

- A troca de verde é precedida pela sinalização de luz amarela e por um período de vermelho em ambas as vias, a fim de garantir que a próxima via que receber a sinalização verde irá encontrar a interseção livre de outros veículos.

Com base nos dados captados pelos sensores, o controlador de semáforo poderá tomar as seguintes decisões: alterar o tempo total de verde disponível para cada via, de forma independente; diminuir o tempo previsto de verde; e não mais fornecer períodos de verde a uma determinada aproximação. Cada decisão dependerá da situação corrente da via, e será explicada mais a frente.

6.2.1 Temporização

O tempo é a grandeza mais crítica para um semáforo, pois sua função mais importante é exatamente controlar os tempos de verde de cada aproximação. O PIC16F72 possui três *timers* independentes, TIMER0, TIMER1 e TIMER2, cada um com características distintas entre si (vide apêndice C).

TIMER0

Este registrador de 8 bits auto-incrementável foi configurado para fornecer um tempo de um segundo. Para isto, o *prescaler* foi designado para o TIMER0 numa proporção de 1:256, ou seja, a cada 256 pulsos o registrador TMR0 é incrementado, em um ritmo de 1.000 pulsos por segundo (FOSC/4). Portanto, para obter um tempo de um segundo, o registrador TMR0 deve “estourar” aproximadamente 16 vezes. Para controlar os “estouros” foi criada a variável “ctrltmr0”.

Esse *timer* foi utilizado para controlar o tempo de verde, cujo período, em segundos, é armazenado na variável “tempverde” (vide apêndice B), e esta é decrementada a cada segundo até chegar ao valor zero.

TIMER1

Este temporizador foi configurado com o objetivo de fornecer um tempo de 30 segundos, que foi o tempo utilizado para efetivar as demandas das aproximações e fazer o cálculo do tempo de verde real de cada via.

Sendo o TMR1 um registrador de 16 bits, o *clock source* interno ser o FOSC/4 (1 MHz) e seu *prescaler* configurado para a proporção de 1:8, deverá ocorrer cerca de 2 “estouros” a cada segundo, portanto para o tempo de 30 segundos tem-se 60 “estouros”. A variável que controla a quantidade de estouros do registrador TMR1 é a “ctrltmr1”.

TIMER2

Este *timer* também foi configurado para fornecer um tempo de um segundo e sua utilização é das mais variadas, podendo servir para controlar o tempo de amarelo, de vermelho, de amarelo intermitente, entre outros.

O *prescaler* do TIMER2 foi configurado para uma proporção de 1:16, o *postscaler* para 1:16 e o registrador de comparação configurado em 0xFF. Sendo o a fonte de pulsos o FOSC/4, o registrador TMR2 deverá “estourar” aproximadamente 16 vezes para ter passado o tempo de um segundo. A variável que controla os “estouros” do TIMER2 é a “ctrltmr2”.

6.2.2 Decisões

Com o objetivo de diminuir ao máximo o atraso veicular e permitir que o fluxo de veículos passante na interseção seja o maior possível, o controlador de semáforo poderá tomar algumas decisões.

Cálculo do Tempo de Verde

Levando em consideração que a sinalização de verde em uma aproximação significa sinalização vermelha na aproximação concorrente de uma mesma interseção, o tempo de verde deve ser o mínimo aceitável a fim de não causar um grande atraso veicular aos condutores. Porém deve-se ter em mente que um tempo de verde que não consiga escoar

todos os veículos que chegaram à interseção durante o período de vermelho poderá gerar um congestionamento.

Portanto, o controlador de semáforo deverá verificar constantemente a demanda nas aproximações e então calcular os tempos de verde de cada via. Para calcular o tempo de verde é necessário coletar a quantidade de veículos que atravessam a interseção a cada 30 segundos e então utilizar a teoria de cálculo do tempo de verde da engenharia de trânsito. A rotina utilizada pelo protótipo do controlador de semáforos está descrita a seguir:

- Colhe informações, a cada 30 segundos, da quantidade de veículos que trafegam a via (q_i);
- Calcula a taxa de ocupação das aproximações (y_i);
- Calcula o somatório das taxas de ocupação(Y);
- Calcula tempo perdido total (Tp);
- Determina o ciclo ótimo (C_o);
- Determina o tempo de verde efetivo de cada aproximação (g_{efi});
- Determina o tempo de verde real de cada aproximação (g_i);
- Calcula a média entre o tempo de verde anterior e o tempo de verde encontrado.

Após esses passos o novo tempo de verde é aplicado em cada aproximação. O diagrama mostrado na Figura 6.7 demonstra esse procedimento.

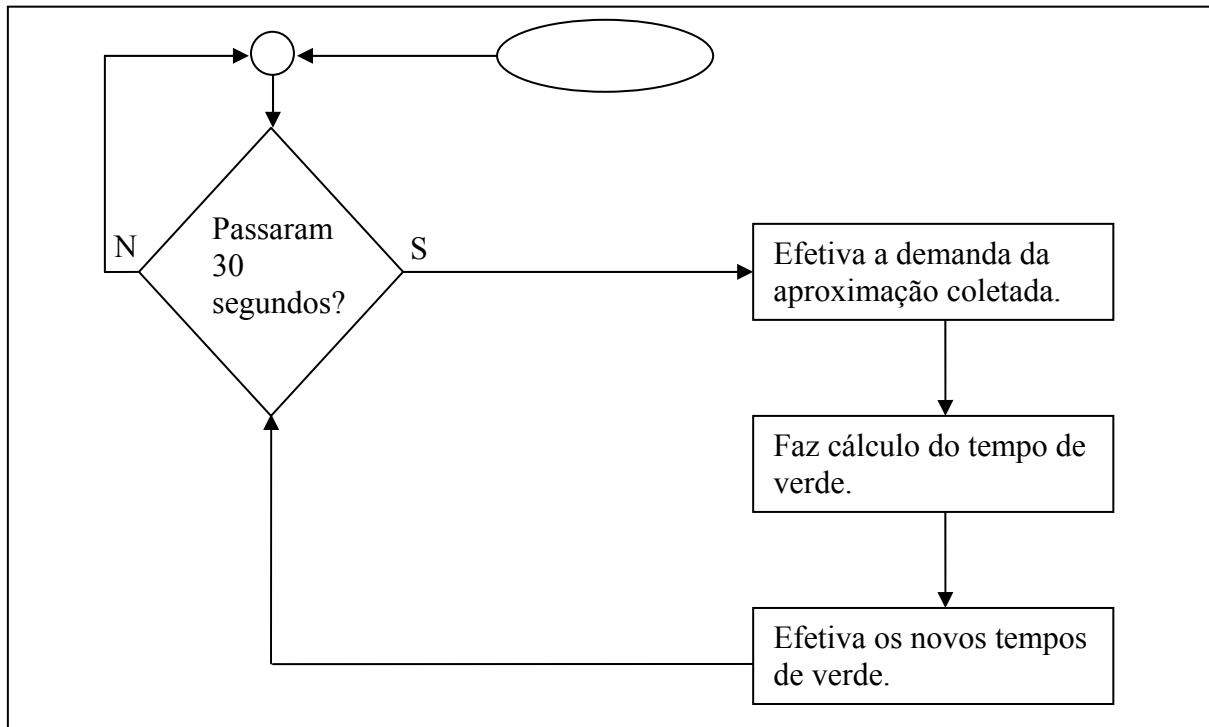


Figura 6.7 – Fluxograma do cálculo do tempo de verde.

Diminuição do Tempo de Verde Previsto

Devido à aleatoriedade do trânsito, o tempo de verde pode acabar sendo superestimado se um grande fluxo de veículos passar pela aproximação em um curto período de tempo (também conhecido como fluxo rajada). Isto causará um desperdício de tempo de verde, já que os cálculos levarão ao acréscimo do tempo sem que haja veículos para aproveitá-lo.

Portanto, caso a fila de veículos formada na aproximação cuja sinalização indica proibição de passagem (luz vermelha) esteja demasiadamente grande, ou seja, todos os sensores indicam a presença de veículos, e os sensores da aproximação em verde não indicam passagem de veículos há pelo menos dez segundos, o controlador de tráfego irá retirar a permissão de passagem da via que estiver em verde, independentemente do tempo de verde previamente calculado, e conceder a aquela em vermelho. Um fluxograma explicando esta situação pode ser visualizado na Figura 6.8.

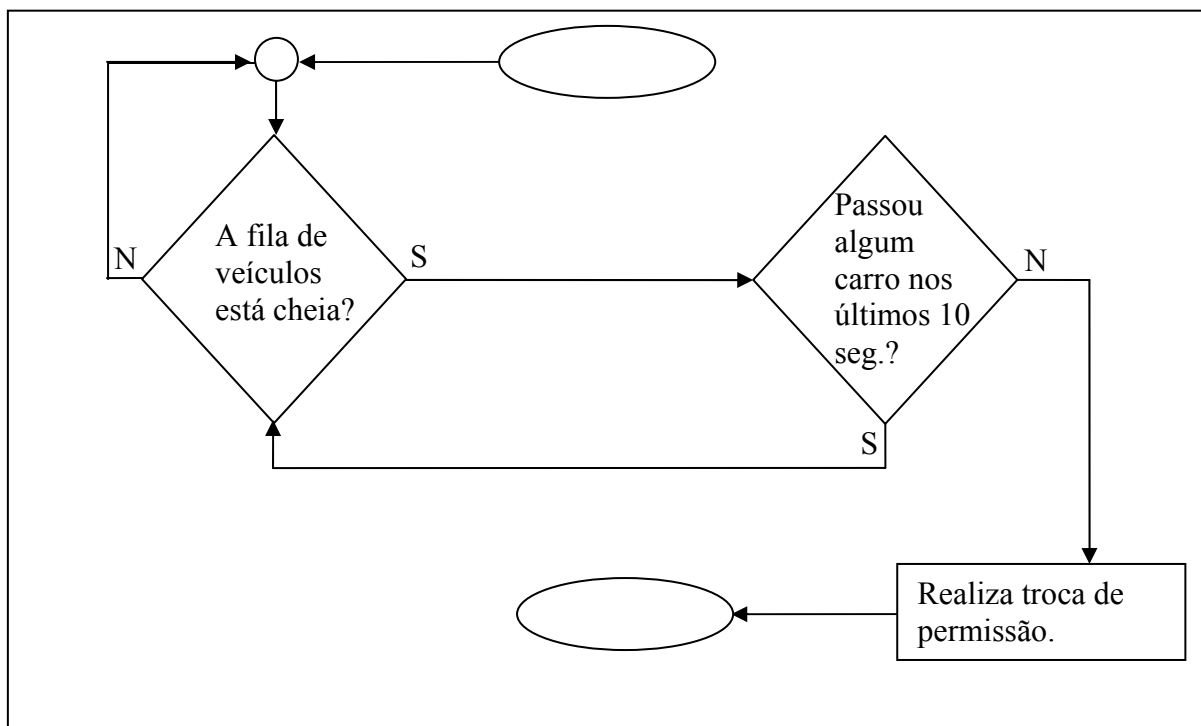


Figura 6.8 – Fluxograma da diminuição do tempo de verde previsto.

Não Fornecimento de Período de Verde

Caso não haja tráfego de veículos em uma determinada via, não existe a necessidade da sinalização verde para sua aproximação, pois a via que possui algum tráfego de veículos pode estar sendo prejudicada pelo desperdício de banda quando esta fica em vermelho e a aproximação que não possui movimento algum fica em verde.

Se a aproximação que não está demandando banda de passagem não receber tempo de verde, o atraso veicular causado aos condutores da aproximação que possui algum fluxo de veículos será nulo. Portanto, a melhor decisão nesta situação é não fornecer tempo de verde àquelas aproximações que não possuem movimento de veículos. O direito ao tempo de verde será concedido novamente quando algum veículo se aproximar da interseção.

O protótipo considera que três cálculos consecutivos (um minuto e meio) com a demanda da aproximação igual a zero são suficientes para não conceder o tempo de verde para aquela aproximação.

Na Figura 6.9 está demonstrado como o controlador de semáforo irá tomar tais decisões.

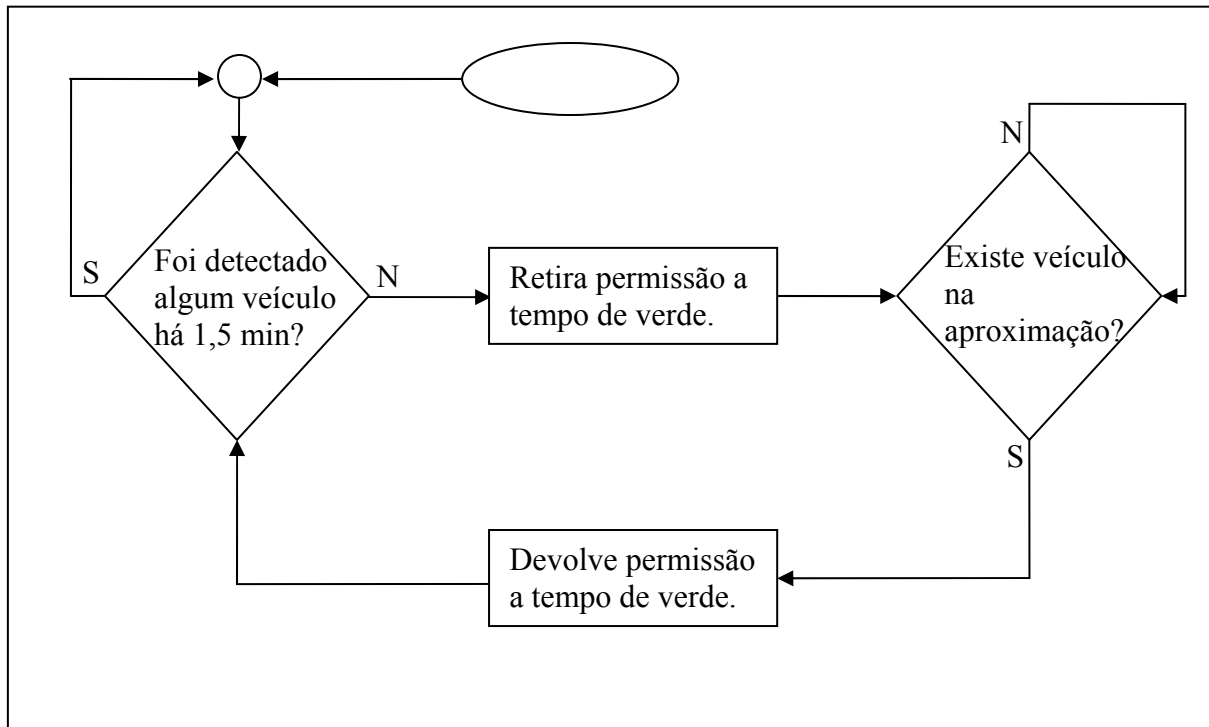


Figura 6.9 – Fluxograma de decisão ao não fornecimento de período de verde.

6.3 Cenário

Um cenário hipotético, porém com características muito próximas do mundo real, foi criado com o objetivo de demonstrar o funcionamento do semáforo.

O cenário será composto por duas avenidas que se cruzam com um ângulo de 90°, sendo uma via arterial (avenida principal) de três faixas, e uma via de ligamento (avenida secundária) de duas faixas, conforme ilustra a Figura 6.10.

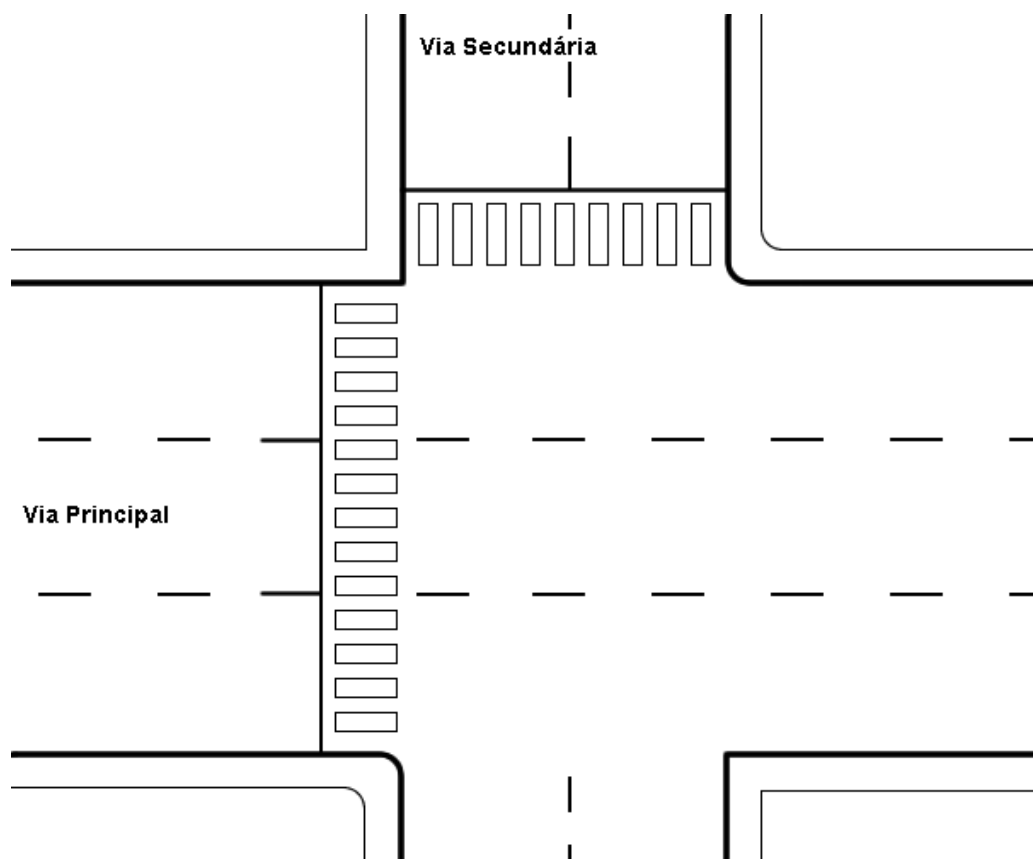


Figura 6.10 – Interseção utilizada no cenário do projeto.

A interseção do projeto será considerada muito distante das interseções adjacentes, portanto toda a regulação será feita com base na regulação de um semáforo isolado.

Os movimentos possíveis nesta interseção são quatro, MV1, MV2, MV3 e MV4. Sendo que o MV1 e MV2 são divergentes, assim como o MV3 e MV4. Os pares MV2, MV3 e MV1, MV4 são convergentes. Como movimentos conflitantes, têm-se o MV3 com MV1, e MV2 com MV4. O diagrama de movimentos possíveis pode ser visualizado na Figura 6.11.

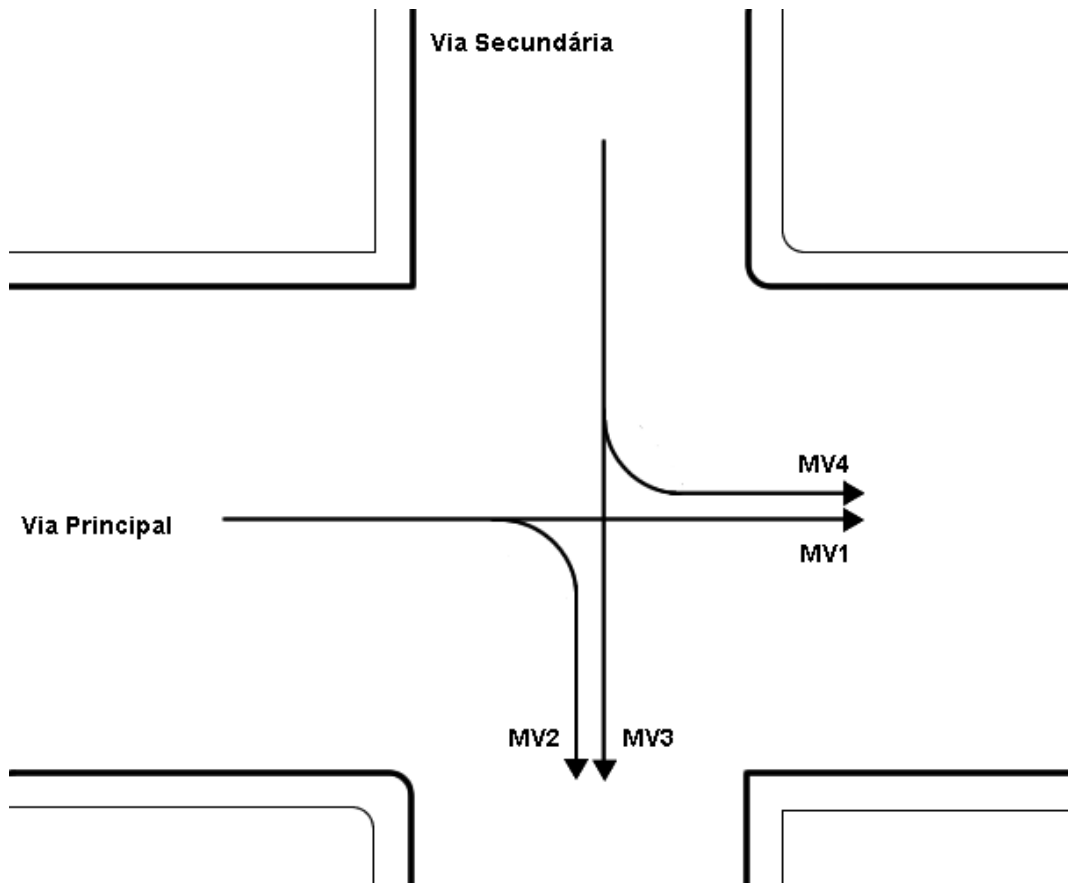


Figura 6.11 – Movimentos possíveis na interseção do protótipo.

Para calcular o fluxo de saturação (seção 5.2.1) será assumido que nesta interseção até 10% dos veículos que passam pelo cruzamento farão a conversão à direita (caso a origem do movimento seja a via principal), ou à esquerda (caso a origem do movimento seja a via secundária), e que seja proibido o estacionamento de veículos rente ao meio-fio. Cada faixa possui 3,1 metros de largura. Portanto pode-se utilizar a Equação 5.3 para estimar o fluxo de saturação de ambas as vias:

$$\text{Via principal: } S = 525.9,3 \cong 4883 v_{eq} / htv$$

$$\text{Via secundária: } S = 525.6,2 = 3255 v_{eq} / htv$$

A máxima velocidade permitida na via principal é de 60 Km/h, e na via secundária é de 40 Km/h. Portanto a velocidade mínima seria de 30 Km/h e 20 Km/h para a via principal e via secundária, respectivamente.

Os tempos de amarelo devem garantir uma travessia segura dos condutores que não tiverem tempo hábil para parar seus veículos. Considerando 6,2 metros de interseção a ser vencida pelo condutor que trafega na via principal a 30 Km/h e 9,3 metros a 20 km/h para o condutor que trafega na via secundária, tem-se:

$$\text{Via principal: } 30/3,6 = 8,33m/s \quad \therefore \quad 6,2/8,3 = 0,74s$$

$$\text{Via secundária: } 20/3,6 = 5,56m/s \quad \therefore \quad 9,3/5,56 = 1,67s$$

Enquanto o veículo que trafega na avenida principal necessita de 0,74 segundos para atravessar a interseção, o veículo que trafega na via secundária necessitará de 1,67 segundos. O Manual dos Semáforos indica um tempo mínimo de três segundos de amarelo, enquanto em Brasília são adotados oito segundos. O tempo de amarelo adotado neste cenário será de seis segundos, obtidos na média entre o tempo mínimo indicado pelo Manual dos Semáforos (três segundos) e tempo mínimo adotado em Brasília (oito segundos):

$$\frac{8s + 3s}{2} = 5,5s \cong 6s$$

O tempo adotado de vermelho em ambas as vias foi de 3 segundos.

O volume de pedestres que atravessam ambas as vias é de até 200 pessoas por hora, o que é considerado baixo o suficiente a ponto de não interferir no projeto.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO

Devido às características aleatórias do tráfego, utilizar um controlador de tráfego de tempo fixo pode não ser a melhor opção, já que é necessário fazer um estudo estatístico prévio e então aplicar os valores obtidos na temporização do semáforo. Neste contexto, um controlador totalmente atuado mostra-se superior na capacidade de vazão do tráfego, já que sua proposta é fazer os cálculos estatísticos em tempo real e aplicá-los ao tráfego de maneira instantânea, reduzindo o atraso veicular total.

O estudo realizado em engenharia de tráfego permitiu a implementação de um sistema que simulasse um controlador de tráfego totalmente atuado e com inteligência para tomar algumas decisões, como dividir o tempo de verde proporcionalmente entre as aproximações e conceder permissão de passagem apenas àquelas vias que possuem alguma demanda.

Portanto, o protótipo demonstrou que aplicando os conhecimentos da engenharia de computação na engenharia de tráfego pode-se elaborar um semáforo totalmente atuado capaz de controlar o tráfego de forma eficiente.

Como sugestão para trabalhos futuros, poderia ser feita uma interface de comunicação entre um computador e o controlador de semáforo, a fim de gerar estatísticas diárias, relatórios e configurar o controlador de tráfego com diversas opções, como o mínimo e o máximo tempo de verde, por exemplo. Além disso, também pode-se projetar um conjunto de semáforos que se comunicam a fim de sincronizar os tempos de verde com o objetivo de implantar um sistema de rede aberta (“onda verde”) ou rede fechada.

BIBLIOGRAFIA

DENATRAN. **Coleção Serviços de Engenharia - Manual de Semáforos**. Volume 4. Brasília. DENATRAN. 2ª Edição. 1984.

LEITE, José Geraldo M. **Engenharia de Tráfego – Métodos de Pesquisa, Características de Tráfego, Interseções e Sinais Luminosos**. São Paulo. CET-SP. 1ª Edição. 1980.

CET. **Planejamento de Tráfego Urbano**. São Paulo. Grêmio Politécnico. 1ª Edição. 1970.

Wikipedia – Light-Emitting Diode. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/LED>. Acessado em 08/10/2006 às 15h47min.

PALM, William J. **Modeling for Real-Time Traffic Control in The Rhode Island Intelligent Road**. Rhode Island University. 2002.

ANDRADE, Luciana Barbosa de. **Animatrônicos**. Brasília. 2005. 101p. Monografia. Curso de Engenharia de Computação. Centro Universitário de Brasília.

LIMA, Cleiton M. V. **Otimização de Trânsito – Uma Abordagem Utilizando Algoritmos Genéticos**. Recife. 2005.

Clube do Hardware – Construindo um Transmissor Infravermelho para o seu PC. Disponível em <http://www.clubedohardware.com.br/artigos/518>. Acessado em 26/08/2006 às 12h30min.

LabTools – Tutorial: Conhecendo o PIC. Disponível em http://www.mosaico-eng.com.br/index.asp?area=04&subarea=g&idioma=por&script=area04_08#. Acessado em 30/08/2006 às 23h20min.

Eletrônica Etc – Exemplos de Programas para PIC. Disponível em <http://www.eletronica.etc.br/igor/pic/index.html>. Acessado em 12/08/2006 às 21h27min.

Wikipedia – Microcontrolador PIC. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/PIC>. Acessado em 15/10/2006 às 13h02min.

Mikroelektronika – Introdução aos Microcontroladores. Disponível em <http://www.mikroelektronika.co.yu/portuguese/product/books/picbook/capitulo1.htm>. Acessado em 07/09/2006 às 23h20min.

APÊNDICE A – MONTAGEM DO CENÁRIO

Material empregado:

- 1x tábua MDF6 70 x 70 cm;
- 15x peça redonda de MDF3 de 3 cm de diâmetro e três furos de 5 mm;
- 4x peça retangular de MDF3 1 x 3 cm com três furos de 5 mm;
- Tinta acrílica nas cores branco, preto e verde;
- Lixa para madeira
- Pistola e refil de cola-quente;
- Fita crepe;
- Lápis;
- Borracha;
- Compasso;
- Régua.



Figura A.1 – Tábua e as outras peças de MDF.

Primeiramente é necessário fazer o desenho do cenário sobre a tábua, utilizando a régua e o compasso para ter uma maior precisão, e demarcando os locais onde haverá a necessidade de fazer os furos, conforme mostra a Figura A.2.



Figura A.2 – Desenho inicial sobre a tábua.

Feito o desenho, o passo seguinte é fazer os furos no local demarcado com a ajuda de uma furadeira utilizando brocas de 30 e 10 mm para madeira e uma lixa para dar o acabamento, o resultado pode ser visto na Figura A.3.

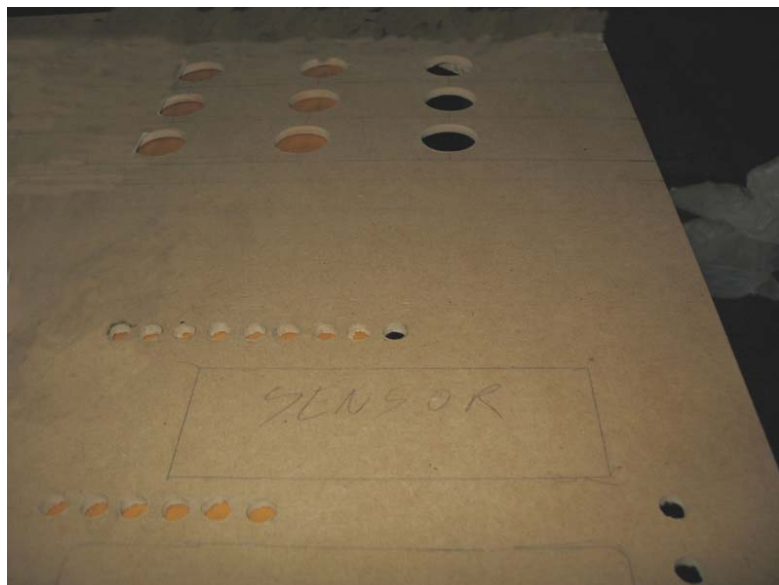


Figura A.3 – Tábua após os furos.

Agora a tábua está pronta para ser pintada. Para evitar “borrões” na pintura, foi colocada a fita crepe sobre o desenho, delimitando a área da pintura conforme a cor. A Figura A.4 demonstra a delimitação e pintura da faixa de pedestre e área verde.



Figura A.4 – Pintura da faixa de pedestres a área verde.

Para pintar a região do asfalto com uma cor cinza escuro, foi necessário fazer a mistura da tinta branca com a tinta preta. A pintura desta região está ilustrada na Figura A.5.



Figura A.5 – Detalhe da pintura da região do asfalto.

Após a secagem da tinta é necessário retirar a fita crepe para dar continuidade à pintura. O resultado pode ser visto na Figura A.6.



Figura A.6 – Aparência após a retirada da fita crepe.

O mesmo procedimento deve ser adotado para pintar a calçada: utiliza-se a fita crepe para demarcar o local a ser pintando, e a cor adotada foi o cinza claro, resultado da mistura da tinta branca com a tinta preta. Após a secagem da tinta, foi retirada a fita, conforme mostra a Figura A.7.



Figura A.7 – Retirada da fita crepe após a secagem da tinta na calçada.

Após a pintura dos elementos macros, é a vez de pintar os detalhes. Neste momento foi pintado os pequenos defeitos originados pela pintura, como brechas e pequenos “borrões”, conforme mostra a Figura A.8.

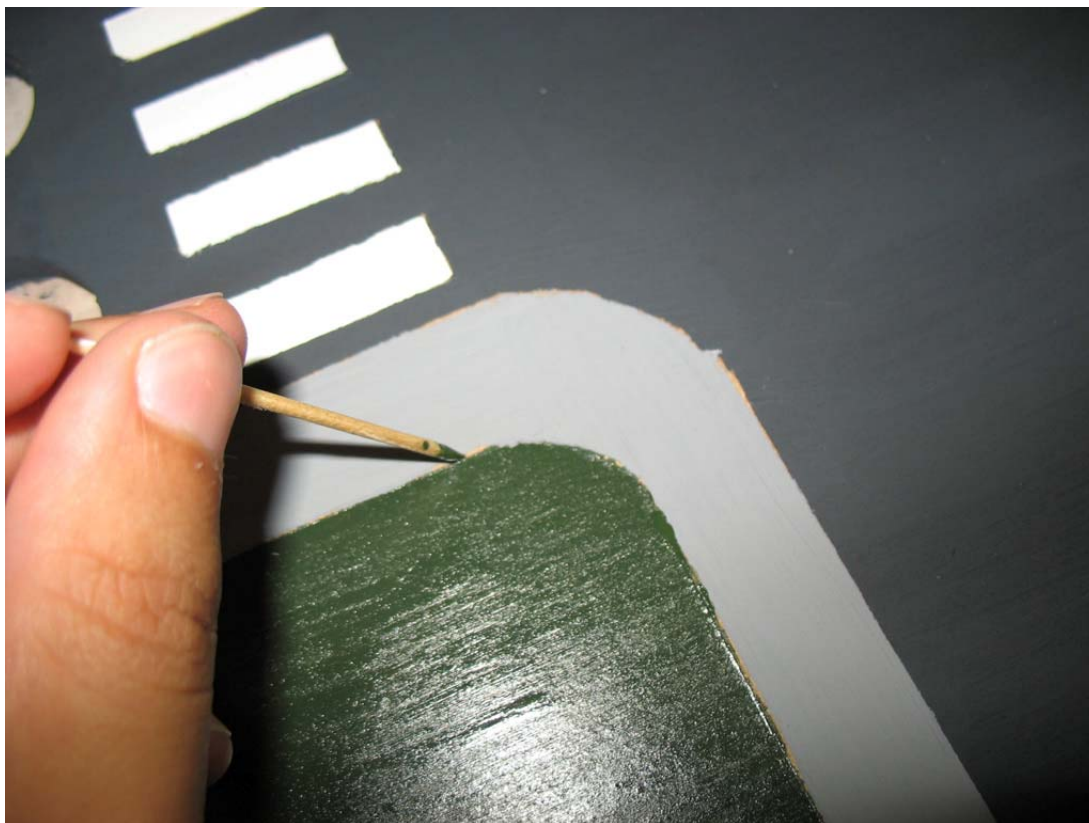


Figura A.8 – Pintura dos detalhes.

Neste ponto o cenário está quase todo pintando, restando apenas fazer as faixas retilíneas. Para isto foram desenhadas com o lápis todas as faixas e então delimitada a área de pintura com a fita crepe. Este passo pode ser visualizado na Figura A.9.



Figura A.9 – Pintura das faixas.

Após o trabalho de pintura foi feita a montagem do circuito eletrônico no cenário. Inicialmente foi colado o protoboard do microcontrolador e dos sensores sobre o cenário. O resultado pode ser visualizado na Figura A.10.

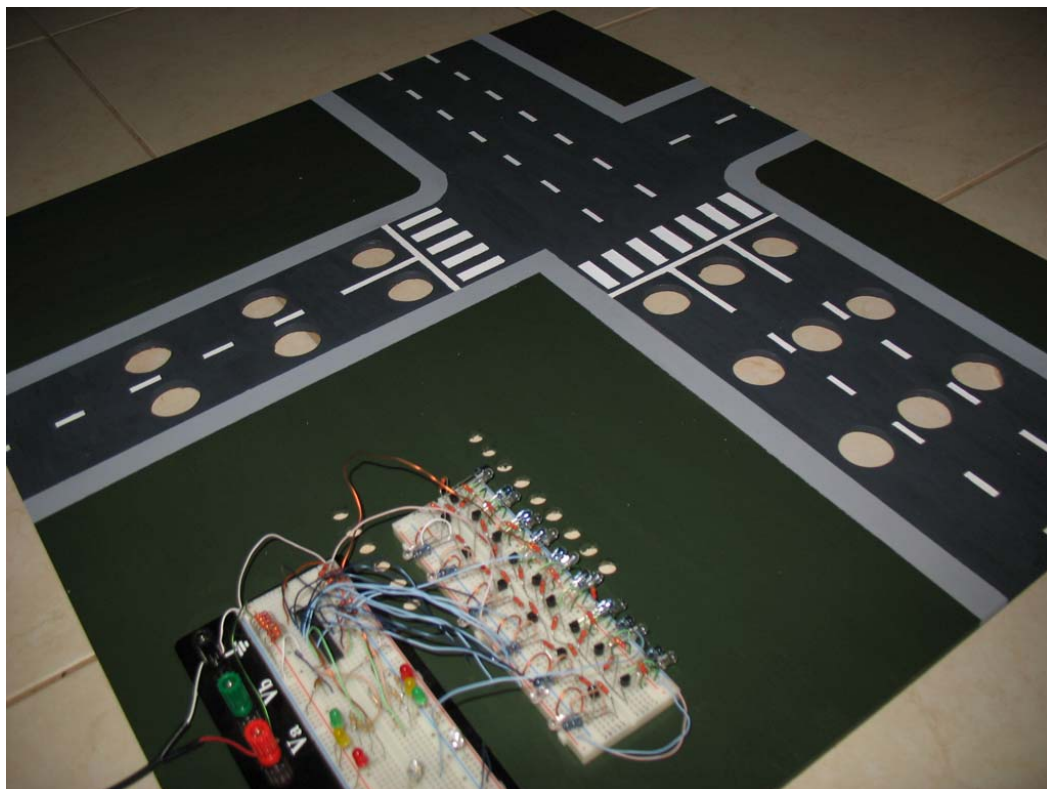


Figura A.10 – Cenário completamente pintando e com os protoboards.

O passo seguinte foi colar as placas de 3 cm de diâmetro no cenário com cola quente, e então colar os LEDs e soldar os fios, conforme mostra a Figura A.11.

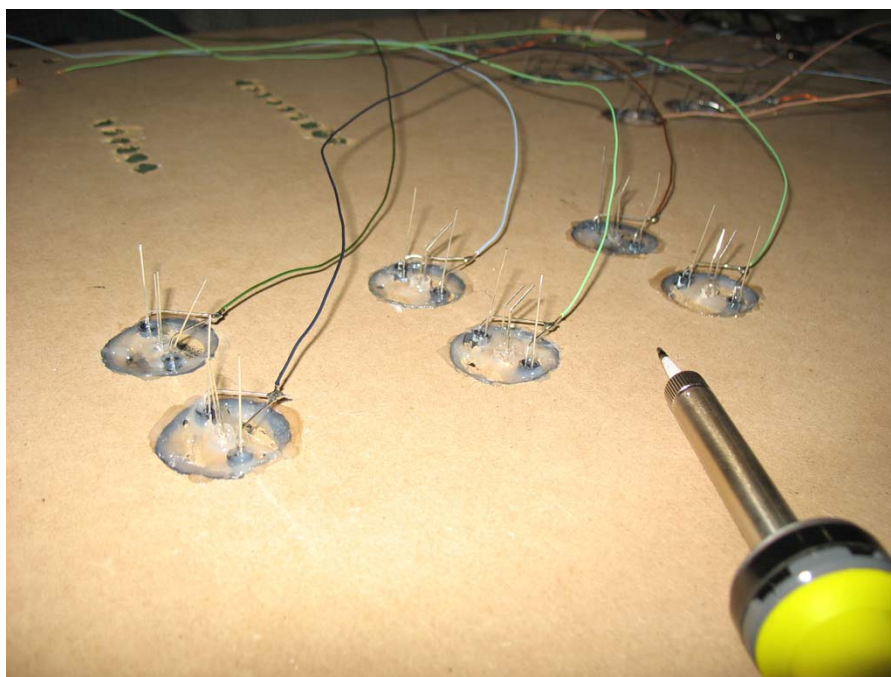


Figura A.11 – Solda dos contatos dos LEDs.

O resultado após a solda e isolamento de todos os contatos dos LEDs que compõem o sensor pode ser visto na Figura A.12.

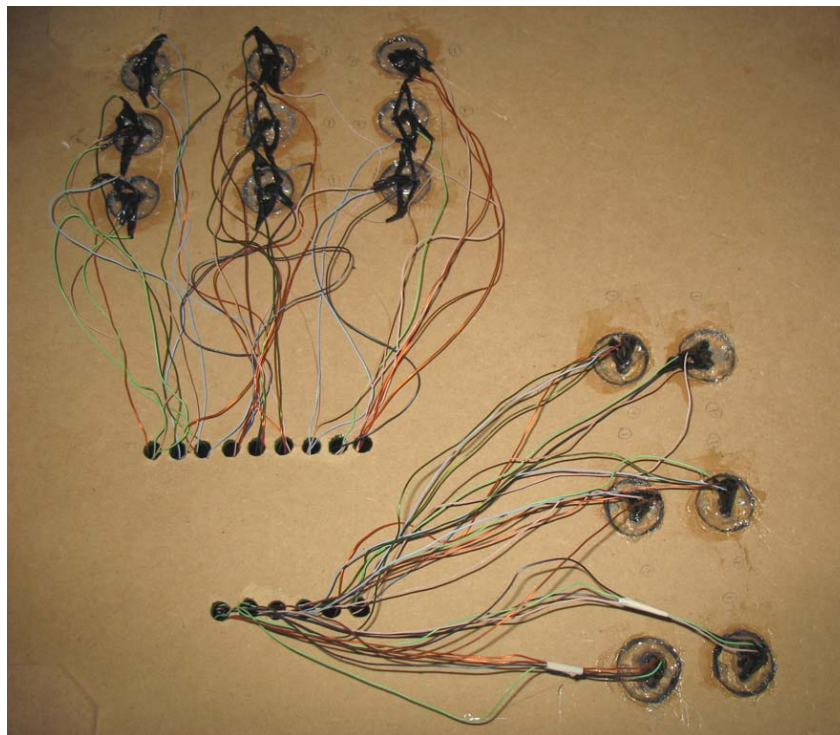


Figura A.12 – Todos os contatos devidamente soldados e isolados.

O resultado final de toda a montagem do circuito pode ser visto na Figura A.13.

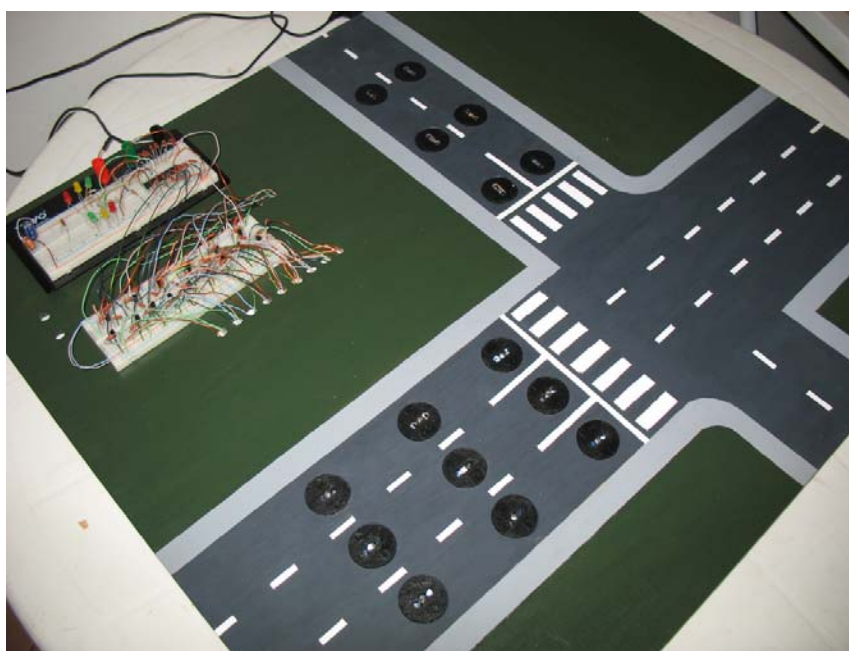


Figura A.13 – Cenário montado.

APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE

```
#include <P16F72.INC>
```

ctrltmr0	equ	0x20	; Variável para controle de 1 segundo do TIMER0
ctrltmr1	equ	0x21	; Variável para controle de tempo do TIMER1
ctrltmr2	equ	0x22	; Variável para controle de tempo do TIMER2
tempotmr2	equ	0x23	; Variável para controle de 1 segundo do TIMER2
W1	equ	0x24	; Variável para backup do acumulador
STATUS1	equ	0x25	; Variável para backup do registrador STATUS
numerador	equ	0x26	; Numerador da divisão
denominador	equ	0x27	; Denominador da divisão
parc1	equ	0x28	; 1a. Parcela da multiplicação
parc2	equ	0x29	; 2a. Parcela da multiplicação
result	equ	0x2A	; Resultado da divisão ou multiplicação
fila	equ	0x2B	; Tamanho da fila
presenca	equ	0x2C	; Verifica se há carros passando pela aprox.
tempoverde	equ	0x2D	; Variável para tempo de verde real
S1	equ	0x2E	; Fluxo de Saturação do Semáforo 1 (constante)
S2	equ	0x2F	; Fluxo de Saturação do Semáforo 2 (constante)
q1	equ	0x30	; Demanda da Aproximação 1
q2	equ	0x31	; Demanda da Aproximação 2
q1_inst	equ	0x32	; Guarda demanda instantânea da Aprox. 1
q2_inst	equ	0x33	; Guarda demanda instantânea da Aprox. 2
y1	equ	0x34	; Taxa de Ocupação da aproximação 1
y2	equ	0x35	; Taxa de Ocupação da aproximação 2
Y	equ	0x36	; Somatório das Taxas de Ocupação Crítica
I1	equ	0x37	; Tempo perdido na aproximação 1
I2	equ	0x38	; Tempo perdido na aproximação 2
Tp	equ	0x39	; Tempo perdido total
Co	equ	0x3A	; Tempo de Ciclo Ótimo
Gef1	equ	0x3B	; Tempo de Verde Efetivo na aproximação 1
Gef2	equ	0x3C	; Tempo de Verde Efetivo na aproximação 2
Gef1_ant	equ	0x3D	; Tempo de Verde Efetivo Anterior da Aprox. 1
Gef2_ant	equ	0x3E	; Tempo de Verde Efetivo Anterior da Aprox. 2
carry	equ	0x3F	; Variável para controle do carry
RB_estado	equ	0x40	; Guarda o estado da PORTB
RB_XOR	equ	0x41	; Recebe o resultado lógico entre os estados
anterior e atual de PORTB			
S1_null	equ	0x42	; Controla o movimento na aproximação 1
S2_null	equ	0x43	; Controla o movimento na aproximação 2
controle	equ	0x44	; Flag de controle:
			; Bit 0: 0 = S1 Aberto (S2 fechado)
			; 1 = S2 Aberto (S1 fechado)
			; Bit 1: 0 = Cálculo de tempo de verde realizado
			; 1 = Cálculo de tempo de verde não
realizado			
			; Bit 2: 0 = Não fazer troca de verde
			; 1 = Fazer troca de verde
			; Bit 3: 0 = Semáforo 1 NÃO pode ser verde
			; 1 = Semáforo 1 pode ser verde
			; Bit 4: 0 = Semáforo 2 NÃO pode ser verde
			; 1 = Semáforo 2 pode ser verde
			; Bit 5: 0 = NÃO necessidade de atualizar
Demanda da Aprox.			

```

;          1 = Necessidade de atualizar Demanda da
Aproximação
; Bit 6: 0 = Tempo solicitado NÃO terminou
;          1 = Tempo solicitado terminou
; Bit 7: 0 = TIMER0 NÃO chegou a 1 segundo
;          1 = TIMER0 chegou a 1 segundo

ORG      00h
goto     inicio      ; pula o vetor de interrupções

;-- Tratamento de interrupções --
ORG      04h          ; Vetor de interrupção
movwf    W1           ; Faz backup do conteúdo do acumulador
movf     STATUS,W     ; Faz backup do...
movwf    STATUS1      ; ...registrador STATUS
;Limpa pedido de interrupção das interrupções inativas
btfss    INTCON,5     ; Verifica se o bit TMR0IE está ativo
    bcf   INTCON,2     ; Limpa pedido de TIMER0
btfss    INTCON,4     ; Verifica se o bit INTE está ativo
    bcf   INTCON,1     ; Limpa pedido de RB0
;Verifica a origem da interrupção
btfsc    INTCON,2     ; Verifica se a interrupção veio do TIMER0
    call  int_TMR0    ; Pula para a rotina de interrupção do TIMER0
btfsc    PIR1,0       ; Verifica se a interrupção veio do TIMER1
    call  int_TMR1    ; Pula para a rotina de interrupção do TIMER1
btfsc    PIR1,1       ; Verifica se a interrupção veio do TIMER2
    call  int_TMR2    ; Pula para a rotina de interrupção do TIMER2
btfsc    INTCON,0     ; Verifica se a interrupção veio do RB<7:4>
    call  int_RB74    ; Pula para a rotina de interrupção do RB<7:4>
btfsc    INTCON,1     ; Verifica se a interrupção veio do RB0
    call  int_RB0     ; Pula para a rotina de interrupção do RB0
movf     STATUS1,W    ; Retorna o valor do registrador...
movwf    STATUS       ; ...STATUS antes da interrupção
movf     W1,W         ; Devolve o valor do acumulador antes da
interrupção
    retfie           ; Retorna da Interrupção

;-- Rotina de interrupção do TIMER0 --
int_TMR0
    decfsz ctrltmr0,F; Decrementa a variável de controle e verifica se
    chegou em zero
    goto  retorno0   ; Se negativo pula para retorno0
    movlw d'16'      ; Realimenta a variável de controle
    movwf ctrltmr0
    bsf   controle,7; Indica que 1 segundo se passou retorno0
    bcf   INTCON,2   ; Libera a interrupção do TIMER0
    return

;-- Rotina de interrupção do TIMER1 --
int_TMR1
    decfsz ctrltmr1,F ; Decrementa a variável de controle e verifica se
    chegou em zero
    goto  retornol   ; Se negativo, pula para retornol
    movlw 0x3C       ; Realimenta variável de controle
    movwf ctrltmr1
    bsf   controle,5 ; Indica necessidade de atualizar a demanda da
    aproximação
    retornol
    bcf   PIR1,0     ; Limpa pedido de interrupção
    return

```



```
;-- Rotina de interrupção do TIMER2 --
```

```
int_TMR2
    decfsz ctrltmr2,F ; Decrementa variável de controle e verifica se
    chegou a zero (1 segundo se passou)
    goto retorno2    ; Se não chegou a zero retorna
    movlw d'16'      ; Realimenta variável auxiliar do TIMER2
    movwf ctrltmr2
    decfsz tempotmr2,F; Verifica se o tempo solicitado terminou
    goto retorno2    ; Em caso negativo, retorna
    bsf     controle,6 ; Marca que o tempo solicitado terminou
retorno2
    bcf     PIR1,1     ; Limpa pedido de interrupção
    return
```

```
;-- Rotina de interrupção do RB7, RB6, RB5 e RB4
```

```
int_RB74
    movf    PORTB,F    ; Destrava PORTB
    bcf     INTCON,0    ; Libera a interrupção do RB<7:4>
    movf    RB_estado,W ; Joga o valor da variável RB_estado em W
    xorwf   PORTB,W    ; Faz um XOR entre W e PORTB
    movwf   RB_XOR
    movf    PORTB,W    ; Salva o estado atual da PORTB
    movwf   RB_estado
    btfsc   controle,0 ; Verifica qual semáforo está em verde
    goto    RB4        ; Chama rotina de interrupção para o semáforo 2
    btfsc   RB_XOR,7    ; Verifica se a mudança de estado foi no RB7
    call    RB7
    btfsc   RB_XOR,6    ; Verifica se a mudança de estado foi no RB6
    call    RB6
    btfsc   RB_XOR,5    ; Verifica se a mudança de estado foi no RB5
    call    RB5
    return
```

```
RB7
    btfss   PORTB,7    ; Verifica se a interrupção aconteceu devido a
    chegada do carro
    incf    q1_inst,F   ; Incrementa a variável de demanda instantânea da
    Aprox. 1
    return
```

```
RB6
    btfss   PORTB,6    ; Verifica se a interrupção aconteceu devido a
    chegada do carro
    incf    q1_inst,F   ; Incrementa a variável de demanda instantânea da
    Aprox. 1
    return
```

```
RB5
    btfss   PORTB,5    ; Verifica se a interrupção aconteceu devido a
    chegada do carro
    incf    q1_inst,F   ; Incrementa a variável de demanda instantânea da
    Aprox. 1
    return
```

```
RB4
    btfss   RB_XOR,4    ; Verifica se a mudança de estado foi referente ao
    semáforo 2
    return          ; Em caso negativo, retorna
    btfss   PORTB,4    ; Verifica se a interrupção aconteceu devido a
    chegada do carro
    incf    q2_inst,F   ; Incrementa a variável de demanda instantânea da
    Aprox. 2
    return
```

```
;-- Rotina de interrupção do RB0
```

```

int_RB0
    incf    q2_inst,1    ; Incrementa a variável de demanda instantânea da
Aprox. 2
    bcf     INTCON,1     ; Libera interrupção de RB0
    return

;-- Inicialização do Sistema --
inicio
    clrf    PORTC        ; Desliga a porta C
    clrf    PORTB        ; Desliga a porta B
    clrf    PORTA        ; Desliga a porta A
    bcf     ADCON0,0     ; Desliga o conversor A/D
    clrf    INTCON       ; Desabilita interrupções para inicialização
BANKSEL    ADCON1       ; Vai para o bank que se encontra o ADCON1(BANK1)
movlw     b'00000111'   ; Seta o PORTA como...
movwf     ADCON1        ; ...portas digitais
movlw     b'00000011'   ; Desabilita interrupções do SSP e CCP1...
movwf     PIE1          ; ... e habilita interrupções de TMR1 e TMR2
movlw     b'10000001'
movwf     TRISC         ; Seta RC<6:1> como saída, RC0 e RC7 como entrada
movlw     b'11110111'
movwf     TRISB         ; Seta RB3 como saída e o restante como entrada
movlw     0xFF
movwf     TRISA         ; Seta PORTA como entrada
movwf     PR2           ; PR2 = 255
movlw     b'10000111'   ; PORTB PullUp desativado, RB0 borda de
subida,...
movwf     OPTION_REG    ; ...clock interno para TIMER0, Prescaler para
TIMER0, 1:256
BANKSEL    PORTC        ; Vai para o bank que se encontra o PORTC (BANK0)
movlw     d'16'
movwf     ctrltmr2      ; Alimenta a variável de controle do TIMER2
movlw     d'10'
movwf     Gef1          ; 10 segundos iniciais de verde para S1
movwf     Gef2          ; 10 segundos iniciais de verde para S2
movwf     Gef1_ant
movwf     Gef2_ant
movwf     tempoverde    ; 10 segundos de tempo de verde inicial
; Estabelecendo os valores constantes
movlw     d'122'        ; S1 = (525.9,3)/40
movwf     S1
movlw     d'81'         ; S2 = (525.6,2)/40
movwf     S2
movlw     d'12'         ; Tp = I1 + I2 = 6 + 6
movwf     Tp
movlw     d'0'
movwf     q1            ; Definindo valores iniciais
movwf     q2            ; Definindo valores iniciais
movwf     q1_inst
movwf     q2_inst
movf      PORTB,W       ; Grava estado inicial da PORTB
movwf     RB_estado
; Prepara os TIMERS
movlw     b'00110001'   ; Prescaler 1:8, Oscilador Interno, TIMER1
Ativado
movwf     T1CON
movlw     0x3C
movwf     ctrltmr1      ; Alimenta a variável de controle do TIMER1
clrf     TMR1L          ; Inicializa o TIMER1 (parte baixa)
clrf     TMR1H          ; Inicializa o TIMER1 (parte alta)
movlw     b'01111011'   ; TIMER2 OFF, 1:16 postscaler, 1:16 prescaler

```

```

        movwf    T2CON
        clrf     TMR2          ; Zera TMR2
        movlw    b'11000000' ; Ativa as interrupções...
        movwf    INTCON        ; ...Interrupções Globais (GIE) e periféricos
(PEIE)
        ;Iniciando os semáforos: piscar os amarelos
        movlw    d'4'          ; Prepara para piscar o...
        movwf    fila          ; ...semáforo 4 vezes
        movlw    b'00011000' ; Inicializa a variavel de controle
        movwf    controle
        bsf      T2CON,2        ; Dispara TIMER2
piscar
        bsf      PORTC,2        ; Liga RC2 (AMARELO - S1)
        bsf      PORTC,5        ; Liga RC5 (AMARELO - S2)
        movlw    d'1'          ; 1 segundo de espera
        movwf    tempotmr2
        call     espera         ; Chama rotina de espera
        bcf      PORTC,2        ; Desliga RC2 (AMARELO - S1)
        bcf      PORTC,5        ; Desliga RC5 (AMARELO - S2)
        movlw    d'1'          ; 1 segundo de espera
        movwf    tempotmr2
        clrf     TMR2          ; Zera TMR2
        call     espera         ; Chama rotina de espera
        decfsz   fila,F        ; decrementa e testa a variável, se zero: pára o
pisca-pisca
        goto     piscar
        bsf      PORTC,3        ; Liga RC3 (VERMELHO - S1)
        bsf      PORTC,6        ; Liga RC6 (VERMELHO - S2)
        movlw    d'3'          ; Aguarda 3 segundos - ambas as vias em vermelho
        movwf    tempotmr2
        clrf     TMR2          ; Zera TMR2
        call     espera         ; Chama rotina de espera
        bcf      T2CON,2        ; Desliga TIMER2
        bcf      PORTC,3        ; Desliga RC3 (VERMELHO - S1)
        bsf      PORTC,1        ; Liga RC1 (VERDE - S1)
        ;Ativa TIMER0
        movlw    d'16'         ; Inicialza variável de controle do TIMER0...
        movwf    ctrltmr0      ; ...para duração de 1 segundo
        clrf     TMR0          ; Zera o TIMER0
        ;Ativa o restante das interrupções
        bsf      INTCON,3      ; Ativa interrupção de RB<7:4>
        bsf      INTCON,5      ; Ativa interrupção de TIMER0

;-- Rotina central do programa --
main
        btfsc    controle,7    ; Verifica se passou 1 segundo
        call     tverde        ; Chama rotina tempo de verde
        btfsc    controle,5    ; Verifica se existe necessidade de atualiza q1
e q2
        call     cont_carros    ; Chama rotina de contagem de veículos (demanda
da aproximação)
        btfsc    controle,1    ; Verifica se existe necessidade de calcular
tempo de verde
        call     calcula_verde ; Chama rotina para cálculo de verde
        btfsc    controle,2    ; Verifica se existe a necessidade da troca do
verde
        call     troca         ; Chama rotina de troca de verde
        btfsc    controle,0    ; Verifica qual semáforo está fechado
        goto     filaS1        ; Chama rotina de verificação da fila de S1
        goto     filaS2        ; Chama rotina de verificação da fila de S2

```

```

filaS1
    clrf    fila                ; Limpa a variável da fila
    btfss   PORTA,4             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTA,5             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTB,1             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTB,2             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTB,5             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTB,6             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTB,7             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTC,0             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTC,7             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    movf    fila,W
    addlw   d'247'              ; Soma o valor da fila com 247
    btfsc   STATUS,C            ; Se houver bit de carry...
    call    fila_cheiaS1        ; ...a fila está cheia, pode ser necessário

trocar o verde
    btfss   controle,3          ; Verifica se S1 está bloqueado
    call    libera_S1
    goto    loop                ; Pula verificação da fila de S2

filaS2
    clrf    fila                ; Limpa a variável da fila
    btfss   PORTA,0             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTA,1             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTA,2             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTA,3             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTB,0             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    btfss   PORTB,4             ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf    fila,F              ; Se houver, incrementa a fila
    movf    fila,W
    addlw   d'251'              ; Soma o valor da fila com 251
    btfsc   STATUS,C            ; Se houver bit de carry...
    bsf     controle,2          ; ...a fila está cheia, pode ser necessário

trocar o verde
    btfss   controle,4          ; Verifica se S2 está bloqueado
    call    libera_S2

loop
    goto    main                ; Loop infinito

;-- Rotina que controla o tempo de verde --
tverde
    bcf     controle,7          ; Limpa bit de controle de 1 segundo do TIMER0
    decfsz  tempoverde,F        ; Decrementa a variável tempoverde (1 segundo se
passou) e...
    return                                ; ...verifica se chegou em zero (tempo esgotado).

Retorna se negativo
    bsf     controle,2          ; Indica a necessidade da troca de verde
    return

```

```

;-- Rotina que efetiva a contagem de veículos --
cont_carros
    movf    q1_inst,F    ; Verifica se q1_inst é zero
    btfsc   STATUS,Z     ; Se for zero...
    goto    incS1_null   ; ...incrementa variável S1_null
    goto    clrS1_null   ; ...senão limpa variável S1_null
incS1_null
    incf    S1_null,F
    goto    fimS1_null
clrS1_null
    clrf    S1_null
fimS1_null
    movf    q1_inst,W    ; Move o valor da variável de demanda instantânea
da aprox.1 na...
    movwf   q1           ;...variável de demanda real da aprox.1
    clrf    q1_inst      ; Limpa q1_inst
    movf    q2_inst,F    ; Verifica se q2_inst é zero
    btfsc   STATUS,Z     ; Se for zero...
    goto    incS2_null   ; ...incrementa variável S2_null
    goto    clrS2_null   ; ...senão limpa variável S2_null
incS2_null
    incf    S2_null,F
    goto    fimS2_null
clrS2_null
    clrf    S2_null
fimS2_null
    movf    q2_inst,W    ; Move o valor da variável de demanda instantânea
da aprox.2 na...
    movwf   q2           ;...variável de demanda real da aprox.2
    clrf    q2_inst      ; Limpa q2_inst
    movlw   0xFD
    addwf   S1_null,W
    btfsc   STATUS,C     ; Verifica se S1_null = 3
    bcf     controle,3   ; S1 não pode ser verde
    movlw   0xFD
    addwf   S2_null,W
    btfsc   STATUS,C     ; Verifica se S2_null = 3
    bcf     controle,4   ; S2 não pode ser verde
    bsf     controle,1   ; Indica a necessidade de fazer o cálculo de tempo
de verde
    bsf     PORTB,3      ; Acende LED indicador de cálculo do tempo de
verde
    bcf     controle,5   ; Limpa marcação para atualizar a demanda da
aproximação
    return

;-- Rotina que libera o verde após bloqueio --
libera_S1
    movlw   0xFF         ; Joga o valor 255 em W
    addwf   fila,W       ; Adiciona fila com 255
    btfss   STATUS,C     ; Se houver carry, tem carro na fila, libera o verde
    return
    bsf     controle,3   ; Libera S2 para ser verde
    btfsc   controle,0   ; Verifica se já está em verde
    bsf     controle,2   ; Solicita troca de verde
    clrf    S1_null
    return

libera_S2
    movlw   0xFF         ; Joga o valor 255 em W

```

```

    addwf    fila,W      ; Adiciona fila com 255
    btfss    STATUS,C    ; Se houver carry, tem carro na fila, libera o verde
    return
    bsf      controle,4  ; Libera S2 para ser verde
    btfss    controle,0  ; Verifica se já está em verde
    bsf      controle,2  ; Solicita troca de verde
    clrf     S1_null
    return

;-- Rotina que faz a troca do tempo de verde --
troca
    bcf      INTCON,5    ; Desabilita interrupção do TIMER0
    btfsc    controle,0  ; Se BIT = 1...
    goto     sem2tol1    ; ...retira permissão de S2 e concede a S1
    btfss    controle,0  ; Se BIT = 0...
    goto     semlto2     ; ...retira permissão de S1 e concede a S2
troca_retorno
    bcf      controle,2  ; Limpa chamada para troca de verde
    clrf     TMR0        ; Reinicia o TIMER0
    bcf      INTCON,2    ; Retira pedido de interrupção do TIMER0
    bsf      INTCON,5    ; Habilita interrupção do TIMER0
    bcf      INTCON,0    ; Limpa pedidos de interrupção de RB<7:4>
    bsf      INTCON,3    ; Ativa interrupções de RB<7:4>
    return

;-- Rotina que faz a troca de permissão: S1->S2 --
semlto2
    btfss    controle,4  ; Verifica se S2 pode ser verde
    goto     troca_retorno
    bcf      PORTC,1     ; Desliga o RC1 (VERDE - S1)
    bsf      PORTC,2     ; Liga o RC2 (AMARELO - S1)
    movlw    d'6'        ; 6 segundos de espera
    movwf    tempotmr2
    clrf     TMR2        ; Zera TIMER2
    bsf      T2CON,2     ; Dispara TIMER2
    call     espera      ; Chama rotina de espera
    bcf      INTCON,3    ; Desabilita interrupção de RB<7:4>
    bcf      PORTC,2     ; Desliga RC2 (AMARELO - S1)
    bsf      PORTC,3     ; Liga o RC3 (VERMELHO - S1)
    movlw    d'3'        ; 3 segundos de espera
    movwf    tempotmr2
    clrf     TMR2        ; Zera TIMER2
    call     espera      ; Chama rotina de espera
    bcf      T2CON,2     ; Desliga TIMER2
    bcf      PORTC,6     ; Desliga RC6 (VERMELHO - S2)
    bsf      PORTC,4     ; Liga RC4 (VERDE - S2)
    bcf      INTCON,1    ; Limpa pedidos de interrupção de RB0
    bsf      INTCON,4    ; Habilita interrupção em RB0
    movf     Gef2,W      ; Move o valor do tempo de verde do S2...
    movwf    tempoverde  ; ...para a variável de tempo de verde real
    bsf      controle,0  ; Indica que S2 está em verde
    goto     troca_retorno

;-- Rotina que faz a troca de permissão: S2->S1 --
sem2tol1
    btfss    controle,3  ; Verifica se S2 pode ser verde
    goto     troca_retorno
    bcf      PORTC,4     ; Desliga o RC4 (VERDE - S2)
    bsf      PORTC,5     ; Liga o RC5 (AMARELO - S2)
    movlw    d'6'        ; 6 segundos de espera
    movwf    tempotmr2

```

```

    clrf    TMR2          ; Zera TIMER2
    bsf     T2CON,2       ; Dispara TIMER2
    call    espera        ; Chama rotina de espera
    bcf     INTCON,4      ; Desabilita interrupção em RB0
    bcf     INTCON,3      ; Desabilita interrupção de RB<7:4>
    bcf     PORTC,5       ; Desliga RC5 (AMARELO - S2)
    bsf     PORTC,6       ; Liga o RC6 (VERMELHO - S2)
    movlw   d'3'          ; 3 segundos de espera
    movwf   tempotmr2
    clrf    TMR2          ; Zera TIMER2
    call    espera
    bcf     T2CON,2       ; Desliga TIMER2
    bcf     PORTC,3       ; Desliga RC3 (VERMELHO - S1)
    bsf     PORTC,1       ; Liga RC1 (VERDE - S1)
    movf    Gef1,W        ; Move o valor do tempo de verde do S1...
    movwf   tempoverde    ; ...para a variável de tempo de verde real
    bcf     controle,0    ; Indica que S1 está em verde
    goto    troca_retorno

;-- Rotina de Cálculo dos tempos de verde --
calcula_verde
    bcf     INTCON,7      ; Bloqueia interrupções
    ; Cálculo da taxa de ocupação na aproximação 1 ( $y1 = q1/S1$ )
    movf    q1,W          ; Move o valor de q1...
    movwf   parc1         ; ...para a 1a. parcela da multiplicação
    movlw   d'100'        ; Multiplica q1 por 100 para calcular a taxa de
ocupação (%)
    movwf   parc2
    call    multiplica     ; Chama a rotina de multiplicação
    movf    result,W       ; Joga o resultado no numerador da...
    movwf   numerador     ; ...divisão
    movf    S1,W           ; Joga o Fluxo de saturação...
    movwf   denominador   ; ...como denominador da divisão
    call    divide         ; Chama rotina de divisão
    movf    result,W       ; Grava o valor da taxa de ocupação na...
    movwf   y1            ; ...variável adequada
    movf    y1,F           ; Testa variável e...
    btfss   STATUS,Z       ; ...verifica se é igual a zero
    goto    calc_y2        ; Se negativo pula para cálculo de y2
    movlw   d'1'          ; Se não iguala a 1
    movwf   y1
    ; Cálculo da taxa de ocupação na aproximação 2 ( $y2 = q2/S2$ )
calc_y2
    movf    q2,W          ; Move o valor de q2...
    movwf   parc1         ; ...para a 1a. parcela da multiplicação
    movlw   d'100'        ; Multiplica q2 por 100 para calcular a taxa de
ocupação (%)
    movwf   parc2
    call    multiplica     ; Chama a rotina de multiplicação
    movf    result,W       ; Joga o resultado no numerador da...
    movwf   numerador     ; ...divisão
    movf    S2,W           ; Joga o Fluxo de saturação...
    movwf   denominador   ; ...como denominador da divisão
    call    divide         ; Chama rotina de divisão
    movf    result,W       ; Grava o valor da taxa de ocupação na...
    movwf   y2            ; ...variável adequada
    movf    y2,F           ; Testa variável e...
    btfss   STATUS,Z       ; ...verifica se é igual a zero
    goto    calc_Y         ; Se negativo pula para cálculo de Y
    movlw   d'1'          ; Se não iguala a 1
    movwf   y2

```

```

; Cálculo da taxa de ocupação total ( $Y = y1 + y2$ )
calc_Y
    movf    y1,W          ; Move o valor de y1 para o acumulador
    addwf   y2,W          ; Soma o valor do acumulado com o valor de y2
    movwf   Y             ; Joga o resultado em Y
    ; Cálculo do ciclo ótimo ( $Co = (1,5.Tp + 5)/(1 - Y)$ )
    movlw   d'100'        ; Multiplica o numerador da equação por 100
para...
    movwf   parc1         ; ...igualar com o denominador, que está
multiplicado por 100
    movlw   d'29'         ;  $1,5 \cdot 16 + 5 = 29$ 
    movwf   parc2
    call    multiplica
    movf    result,W      ; Joga resultado da multiplicação (2900) no...
    movwf   numerador     ; ...numerador
    movf    Y,W           ; Subtrai Y de 100...
    sublw   d'100'
    movwf   denominador   ; ...e joga no denominador
    call    divide        ; executa a divisão:  $2900/(100-Y)$ 
    movf    result,W      ; Joga o resultado da divisão...
    movwf   Co            ; ...na variável de ciclo ótimo
    ; Cálculo do verde efetivo do Semáforo 1 ( $Gef1 = (y1 \cdot (Co - Tp))/Y$ )
    movf    Tp,W          ; Move tempo perdido para o acumulador
    subwf   Co,W          ; Faz ( $Co - Tp$ )
    movwf   parc1         ; Joga o resultado da subtração na 1a. parcela
    movf    y1,W          ; Joga y1 na segunda parcela para fazer ( $y1 \cdot (Co$ 
- 16))
    movwf   parc2
    call    multiplica    ; Chama a multiplicação
    movf    result,W      ; Joga o resultado no numerador para fazer a...
    movwf   numerador     ; ... divisão ( $y1.(Co-16)) / Y$ 
    movf    Y,W
    movwf   denominador   ; Valor de Y como denominador
    call    divide        ; Chama a divisão
    movf    result,W
    movwf   Gef1          ; Grava resultado em Gef1
    ; Cálculo do verde efetivo do Semáforo 2 ( $Gef2 = (y2 \cdot (Co - Tp))/Y$ )
    movf    Tp,W          ; Move tempo perdido para o acumulador
    subwf   Co,W          ; Faz ( $Co - Tp$ )
    movwf   parc1         ; Joga o resultado da subtração na 1a. parcela
    movf    y2,W          ; Joga y2 na segunda parcela para fazer ( $y2 \cdot (Co$ 
- 16))
    movwf   parc2
    call    multiplica    ; Chama a multiplicação
    movf    result,W      ; Joga o resultado no numerador para fazer a...
    movwf   numerador     ; ... divisão ( $y2.(Co-16)) / Y$ 
    movf    Y,W
    movwf   denominador   ; Valor de Y como denominador
    call    divide        ; Chama a divisão
    movf    result,W
    movwf   Gef2          ; Grava resultado em Gef2
    ; Verifica se os tempos de verde calculados foram maiores que o tempo
máximo de 60s
    movf    Gef1,W        ; Grava o valor de Gef1 no acumulador
    addlw   d'195'        ; Soma com 195
    btfss   STATUS,C      ; Se houver estouro do carry, o valor é maior que
60s
    goto    verif1        ; Senão pula para a verificação seguinte
    movlw   d'60'         ; Joga o valor 60 no tempo de verde do Semáforo 1
    movwf   Gef1
verif1

```



```

    movf   Gef2,W           ; Grava o valor de Gef2 no acumulador
    addlw  d'195'          ; Soma com 195
    btfss  STATUS,C        ; Se houver estouro do carry, o valor é maior que 60s
    goto   verif2          ; Senão pula para a verificação seguinte
    movlw  d'60'           ; Joga o valor 60 no tempo de verde do Semáforo 2
    movwf  Gef2
verif2 ; Verifica se os tempos de verde calculados foram menores que o
tempo mínimo de 10s
    movf   Gef1,W           ; Grava o valor de Gef1 no acumulador
    addlw  d'246'          ; Soma com 246
    btfsc  STATUS,C        ; Se NÃO houver estouro de carry, valor menor que 10
    goto   verif3          ; Senão pula para a verificação seguinte
    movlw  d'10'           ; Joga o valor 10 no tempo de verde do semáforo 1
    movwf  Gef1
verif3
    movf   Gef2,W           ; Grava o valor de Gef2 no acumulador
    addlw  d'246'          ; Soma com 246
    btfsc  STATUS,C        ; Se NÃO houver estouro de carry, valor menor que 10
    goto   fim             ; Senão pula para o fim das verificações
    movlw  d'10'           ; Joga o valor 10 no tempo de verde do semáforo 2
    movwf  Gef2
fim
    ;Faz a média do novo verde calculado com o verde calculado
    anteriormente
    movf   Gef1,W           ; Joga o valor do verde atual em W
    addwf  Gef1_ant,W       ; Gef1 + Gef1_ant
    movwf  numerador        ; O resultado joga como numerador
    movlw  d'2'             ; O literal 2 como denominador
    movwf  denominador     ;
    clrf   carry            ; Limpa variável de carry para fazer a divisão
    call   divide           ; Chama a divisão
    movf   result,W        ;
    movwf  Gef1            ; Grava o resultado em Gef1
    movwf  Gef1_ant        ; Grava o resultado em Gef1_ant
    movf   Gef2,W           ; Joga o valor do verde atual em W
    addwf  Gef2_ant,W       ; Gef2 + Gef2_ant
    movwf  numerador        ; O resultado joga como numerador
    movlw  d'2'             ; O literal 2 como denominador
    movwf  denominador     ;
    clrf   carry            ; Limpa variável de carry para fazer a divisão
    call   divide           ; Chama a divisão
    movf   result,W        ;
    movwf  Gef2            ; Grava o resultado em Gef2
    movwf  Gef2_ant        ; Grava o resultado em Gef2_ant
    bcf    controle,1       ; Registra que o cálculo foi efetuado
    bcf    PORTB,3          ; Desliga LED indicar de cálculo de tempo de verde
    bsf    INTCON,7         ; Libera Interrupções
    return

;-- Rotina para multiplicar PARC1 e PARC2 --
multiplica
    clrf   result          ; Inicializa variável de resultado
    movf   parc1,F         ; Testa parcela 1...
    btfsc  STATUS,Z        ; ...para verificar se é zero
    return                ; Se parc1 = 0, então retorna com RESULT = 0
    movf   parc2,F         ; Testa parcela 2...
    btfsc  STATUS,Z        ; ...para verificar se é zero
    return                ; Se parc2 = 0, então retorna com RESULT = 0
    clrw                   ; Limpa acumulador
    clrf   carry
rot_mult

```

```

    addwf  parc2,0      ; Adiciona a PARC2 com o W
    btfsc  STATUS,C
    incf   carry,F
    decfsz parc1,F      ; Decrementa PARC1...
    goto  rot_mult      ; ...Se diferente de 0 volta para a rotina
    movwf  result       ; senão grava resultado em RESULT
    return

;-- Rotina para dividir NUMERADOR e DENOMINADOR --
divide
    incf   carry,F
    clrf   result       ; Inicializa variável de resultado
    movf   denominador,F ; Testa o denominador...
    btfsc  STATUS,Z     ; ...para verificar se é zero
    return                                ; Se denominador = 0, então retorna com result
= 0
    movf   numerador,F  ; Testa o numerador...
    btfsc  STATUS,Z     ; ...para verificar se é zero
    return                                ; Se numerador = 0, então retorna com result =
0
    movf   denominador,W ; Joga o valor do denominador em W
    bsf    STATUS,C     ; Seta o bit de carry
rot_div
    btfss  STATUS,C     ; Pula se houve o bit de carry
    goto  verific_carry
    incf   result,F     ; Incrementa a variável result
    subwf  numerador,F  ; Subtrai o valor do denominador do numerador
    goto  rot_div
retorna
    decf   result,F
    return
verif_carry
    decf   carry,F      ; Decrementa o carry
    btfsc  STATUS,Z     ; Verifica se o carry chegou a zero
    goto  retorna      ; Em caso afirmativo, retorna
    bsf    STATUS,C     ; Seta o carry de STATUS
    goto  rot_div      ; Retorna para a divisão

;-- Rotina que verifica possibilidade de troca de verde --
fila_cheiaS1
    clrf   presenca     ; Limpa variável
    btfss  PORTA,0      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf   presenca,F   ; Se houver, incrementa presenca
    btfss  PORTA,1      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf   presenca,F   ; Se houver, incrementa presenca
    btfss  PORTA,2      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf   presenca,F   ; Se houver, incrementa presenca
    btfss  PORTA,3      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf   presenca,F   ; Se houver, incrementa presenca
    btfss  PORTB,0      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf   presenca,F   ; Se houver, incrementa presenca
    btfss  PORTB,4      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf   presenca,F   ; Se houver, incrementa presenca
    movf   presenca,F
    btfss  STATUS,Z     ; Verifica se presenca é zero
    return
    bsf    controle,2   ; Indica troca de verde
    return

fila_cheiaS2
    clrf   presenca     ; Limpa variável

```

```

    btfss PORTA,4      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTA,5      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTB,1      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTB,2      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTB,5      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTB,6      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTB,7      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTC,0      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    btfss PORTC,7      ; Verifica se há carro sobre sensor
    incf  presença,F  ; Se houver, incrementa presença
    movf  presença,F
    btfss STATUS,Z     ; Verifica se presença é zero
    return
    bsf   controle,2   ; Indica troca de verde
    return

;-- Rotina de Espera --
espera
    btfss controle,6   ; Verifica se o tempo solicitado terminou
    goto  espera       ; Se negativo, loop
    bcf   controle,6   ; Limpa bit e controle de tempo
    return             ; Se afirmativo, retorna

end

```

APÊNDICE C – MICROCONTROLADOR PIC16F72

Um microcontrolador se difere de um microprocessador em vários aspectos. Para que um microprocessador possa ser usado, é necessário utilizar em conjunto vários outros componentes adicionais, como memórias, placas com controladores, interfaces específicas, entre outros. Isso significa que um microprocessador é, na verdade, o cérebro de um grande computador. Já o microcontrolador foi projetado para ter todos seus componentes em um único chip. Portanto todos seus periféricos já estão contidos nele.

O PIC é um microcontrolador de arquitetura Harvard e instruções RISC, capacitado para processar dados de oito bits (com exceção da nova família 24F e 24H que processam dados de 16 bits) projetado e produzido pela Microchip. Possui uma extensa variedade de modelos e recursos, que podem chegar a um *clock* de até 48Mhz. Seu ciclo de instrução é de quatro períodos de *clock*, exceto instruções de desvio, que necessitam de oito ciclos de *clock*. Existem modelos dotados de codificadores para uma criptografia patenteada pela própria Microchip, denominada de Keeloq®.

O PIC16F72 é um CI de 28 pinos, dotado de 2.048 bytes de memória de programa do tipo FLASH Memory, o que permite um ciclo de regravação de 1000 vezes, 128 bytes de memória de dados (RAM), 22 pinos de entrada e saída configuráveis, três *timers* independentes, módulo CCP, cinco canais conversores de analógico para digital de oito bits cada, oito interrupções independentes e *set* de 35 instruções.

Este microcontrolador possui, ainda, alguns recursos especiais poderosíssimos como:

- *Sleep*: permite que o microcontrolador entre em estado de *stand-by*, com o objetivo de economizar energia;
- *Watchdog*: reinicia o microcontrolador automaticamente em caso de falhas;

- *Programmable Code Protection*: quando ativado, impede que o código fonte gravado no microcontrolador seja recuperado;
- *In-Circuit Serial Programming*: permite que o microcontrolador seja programado e “debugado” no próprio circuito em que ele deva operar.

O PIC16F72 foi projetado para consumir pouquíssima energia (consome menos de 0.6 mA quando alimentado com 3V e menos de 1μA em modo *stand-by*) e operar em temperaturas de -55° a +125°.

Ciclo de Instrução

O *clock* é quem controla os “passos” do microcontrolador, e este é obtido através de um componente denominado oscilador. Nos microcontroladores da família PIC pode-se usar o oscilador interno ou acoplar um oscilador externo.

O circuito interno do PIC divide o *clock* em quatro fases independentes, Q1, Q2, Q3 e Q4. Essas quatro pulsações dão origem a um ciclo de instruções, ou simplesmente ciclo de máquina.

A execução de uma instrução qualquer é antecedita pela extração da instrução que se encontra na linha seguinte. O código da instrução é extraído da memória de programa em Q1 e escrito no registro de instrução em Q4. A decodificação e execução desta mesma instrução serão feitas na fase seguinte. A Figura C.1 exemplifica esse processo.

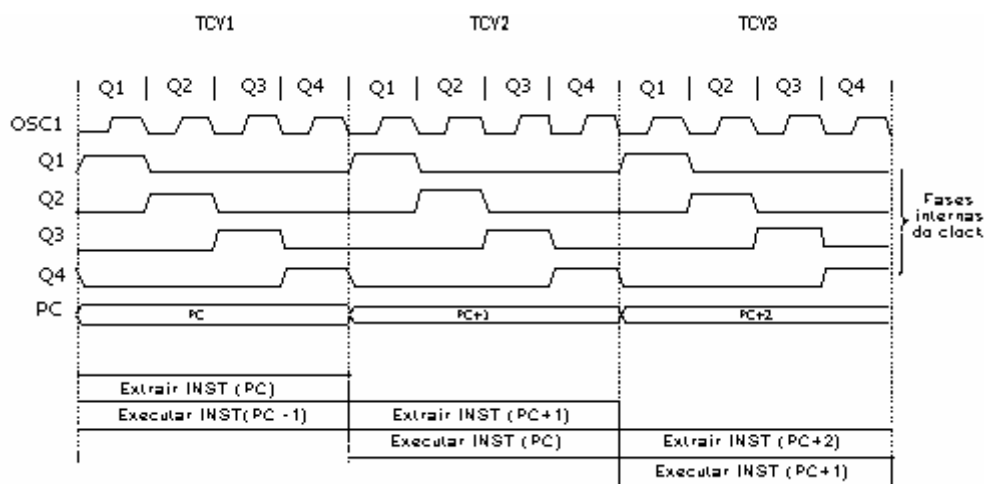


Figura C.1 – Ciclo de instrução.

Fonte: Introdução aos Microcontroladores

Pipeline

A extração do código de uma instrução da memória de programa é feita em um ciclo de instrução, enquanto sua decodificação e execução são feitas no ciclo seguinte. Porém, já que o microcontrolador simultaneamente executa uma instrução e extrai o código da instrução seguinte da memória de programa pode-se considerar, para efeitos práticos, que para cada instrução, à exceção da primeira instrução e instruções de desvios, apenas um ciclo de máquina é gasto em seu processamento.

Oscilador

No PIC16F72 existem quatro diferentes configurações para o oscilador, LP, XT, HS e RC. Para seleccionar o modo do oscilador que será usado pelo microcontrolador, deve-se configurar os dois bits menos significativos do registrador 0x2007 conforme Tabela C.1:

Tabela C.1 – Seleccionando o oscilador do PIC16F72

F0SC1	F0SC0	Oscilador
0	0	LP
0	1	XT
1	0	HS
1	1	RC

O oscilador em modo XT, LP ou HS necessita de um oscilador de cristal externo a ser conectado nas portas OSC1 e OSC2 do microcontrolador, conforme ilustrado na Figura C.2, e diferenciam-se pela frequência máxima de operação.

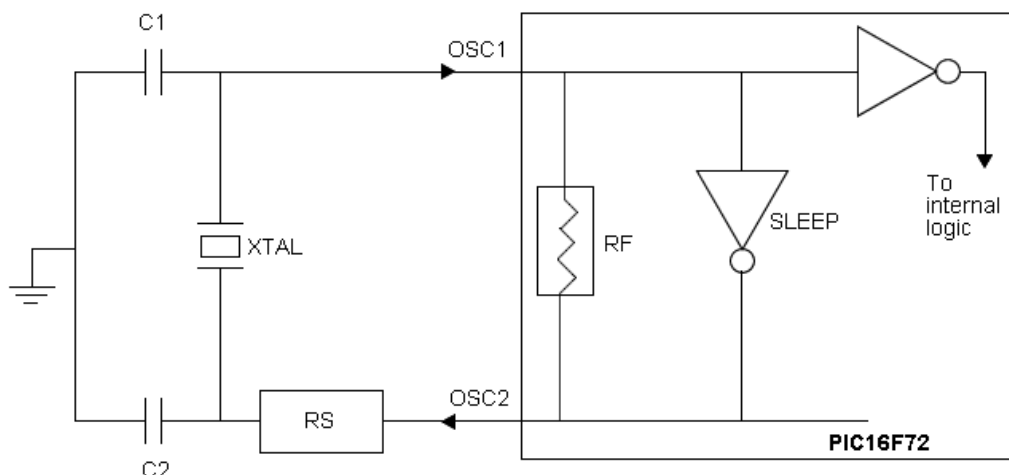


Figura C.2 – Acoplamento de um oscilador externo no PIC16F72.

Fonte: Datasheet PIC16F72

A Tabela C.2 relaciona as frequências possíveis e os capacitores recomendados para cada frequência.

Tabela C.2 – Seleção de capacitores e osciladores de cristal.

Tipo do Oscilador	Frequência do Cristal	C1	C2
LP	32 kHz	33 pF	33 pF
	200 kHz	15 pF	15 pF
XT	200 kHz	56 pF	56 pF
	1 MHz	15 pF	15 pF
	4 MHz	15 pF	15 pF
HS	4 MHz	15 pF	15 pF
	8 MHz	15 pF	15 pF
	20 MHz	15 pF	15 pF

Em aplicações que a temporização não é um fator crítico, o modelo do oscilador RC torna-se mais econômico e simples.

A Figura C.3 mostra como o oscilador RC deve ser ligado ao PIC16F72.

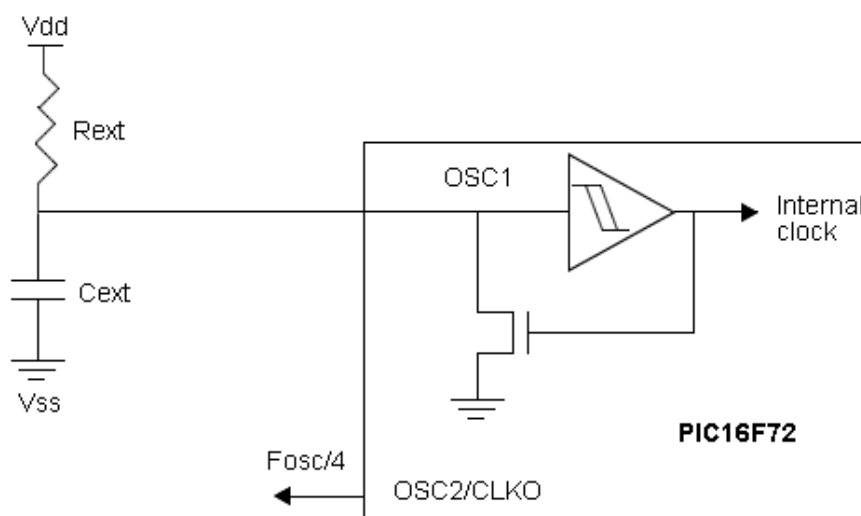


Figura C.3 – Esquema eletrônico para utilização do oscilador em modo RC.

Fonte: Datasheet PIC16F72

Com um valor de R abaixo de $2,2\text{ K}\Omega$ o oscilador pode tornar-se instável ou mesmo parar de oscilar. Para um valor de R muito grande, próximo a $1\text{ M}\Omega$, o oscilador torna-se muito sensível ao ruído externo. O recomendado é que o valor da resistência R situa-se entre $3\text{ K}\Omega$ e $100\text{ K}\Omega$. A fim de evitar o ruído e aumentar a estabilidade, é indicado utilizar um capacitor de capacitância acima de 20 pF .

Unidade Central de Processamento

A unidade central de processamento interliga todas as partes do microcontrolador através dos barramentos de dados e de endereço, conforme Figura C.4, de modo que este se comporte como um sistema. Sua função mais importante é decodificar e executar as instruções do programa.

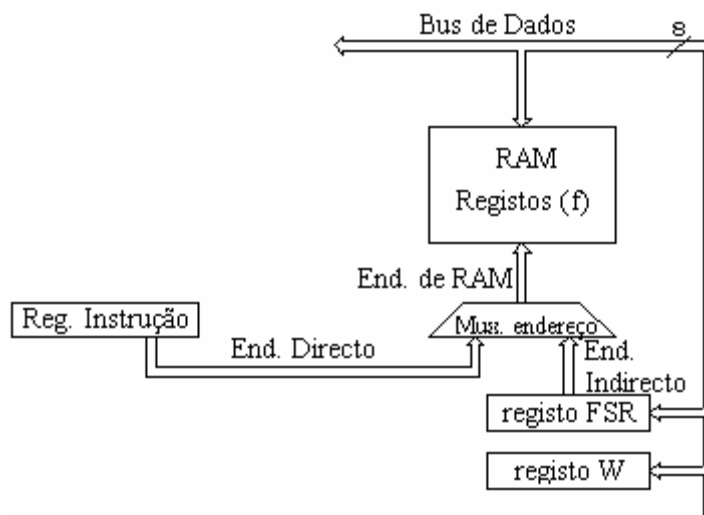


Figura C.4 – Barramento de dados e de endereço típico dos microcontroladores PIC.

Fonte: Introdução aos Microcontroladores

Cada instrução corresponde a um conjunto de ações a serem executadas. Essas ações podem envolver transferência de dados de um local da memória para outro, ou mesmo da memória para uma determinada porta, além de diversos cálculos. Portanto a CPU deve estar ligada a todas as partes do microcontrolador, e isto é possível através do barramento de dados e de endereço.

A unidade responsável pelas operações aritméticas de adição, subtração e deslocamento de bits, além das operações lógicas, é a ALU. A família 10, 12, 14, 16 e 18 dos microcontroladores PIC, possuem uma ALU e registradores de uso geral de 8 bits.

Um modelo típico da ALU dos microcontroladores PIC pode ser visualizado na Figura C.5.

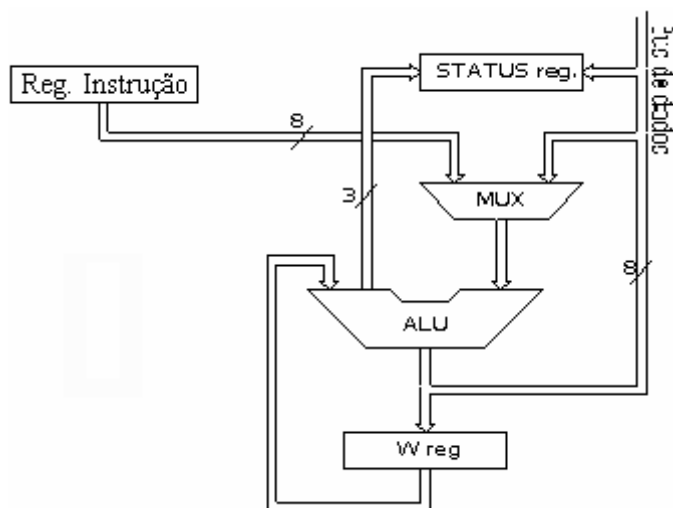


Figura C.5 – Unidade lógica e aritmética típica dos microcontroladores PIC.

Fonte: Introdução aos Microcontroladores

Nas instruções com dois operadores, um operador é o registro de trabalho W (*working register*) e o outro é uma constante ou um registrador. Esse registrador pode ser um registrador de uso genérico (GPR) ou mesmo um registrador de funções especiais (SFR). Em instruções com apenas um operador, este operando é o registrador W ou o conteúdo dos outros registradores.

Quando são executadas operações lógicas ou aritméticas a ALU controla o estado dos bits de *status*. Portanto, dependendo apenas do resultado da operação, a ALU pode alterar o valor dos bits de *Carry* (C), *Digit Carry* (DC) ou *Zero* (Z).

registradores de funções especiais do tipo *peripheral* são utilizados para configurar ou alterar o estado de dispositivos periféricos ao microcontrolador.

Nesta seção serão mostrados os registradores do tipo *core*.

Registrador STATUS

O registrador STATUS contém o estado aritmético da ALU, do banco de memória selecionado e informações sobre um possível *reset*. Neste registrador estão três bits importantíssimos, o C, DC e Z.

O registrador STATUS pode ser utilizado como operando em uma instrução lógica ou aritmética. Porém, quando isso acontece não é possível escrever nos bits C, DC e Z. O recomendável é que quando houver a necessidade de alterar este registrador, seja usada uma instrução que não afete o estado desses três bits.

- Bit 7 (IRP): seleciona o banco de registradores para o endereçamento indireto: 1 = banco 2 e 3, 0 = banco 0 e 1;
- Bit 6 e 5 (RP1 e RP0): seleciona o banco de registradores para o endereçamento direto, conforme Tabela C.3;
- Bit 4 (TO): bit somente para leitura, indica se houve *timeout* do *watch dog*: 1 = após ser ligado ou após as instruções CLRWDI e SLEEP, 0 = ocorreu o *timeout* do WATCHDOG;
- Bit 3 (PD): indica se o microcontrolador está em modo de *stand by*. Bit somente para leitura: 1 = após ser ligado ou após a instrução CLRWDI, 0 = após a instrução SLEEP;
- Bit 2 (Z): indica se o resultado de uma operação lógica ou aritmética foi igual a zero: 1 = resultado igual a zero, 0 = resultado diferente de zero;
- Bit 1 (DC): indica se houve bit de *carry* da quarta para a quinta casa menos significativa: 1 = houve *carry*, 0 = não houve *carry*;

- Bit 0 (C): indica se houve bit de *carry*: 1 = houve *carry*, 0 = não houve *carry*.

Tabela C.3 – Configuração dos bits 5 e 6 do registrador STATUS.

RP1	RP0	Banco
0	0	BANK0
0	1	BANK1
1	0	BANK2
1	1	BANK3

Registrador OPTION

O registrador OPTION contém vários bits de controle para configurar o *prescaler* para o TIMER0 ou o *postscaler* para o WATCHDOG, as interrupções externas e o *pull-up* na porta B.

- Bit 7 (RBPU): ativa o *pull-up* na porta B: 1 = *pull-up* desativado, 0 = *pull-up* ativado;
- Bit 6 (INTEDG): seleciona qual borda do sinal gerará uma interrupção em RB0: 1 = borda de subida, 0 = borda de descida;
- Bit 5 (T0CS): seleciona a fonte para incremento do TIMER0: 1 = fonte externa (transição no pino RA4), 0 = ciclo de *clock* interno;
- Bit 4 (T0SE): seleciona qual borda do sinal gerará um incremento no TIMER0: 1 = incremento na borda de subida no pino RA4, 0 = incremento na borda de descida no pino RA4;
- Bit 3 (PSA): designa o *prescaler*: 1 = *prescaler* designado para o WATCHDOG, 0 = *prescaler* designado para o TIMER0.
- Bit 2, bit 1 e bit 0 (PS2, PS1 e PS0): seleciona a taxa do *prescaler*, conforme Tabela C.4. Caso haja a necessidade do TIMER0 operar em proporção 1:1, o *prescaler* deverá ser designado para o WATCHDOG.

Tabela C.4 – Taxa do *prescaler* dependendo do módulo designado.

Bits	Taxa para TIMER0	Taxa para WATCHDOG
000	1:2	1:1
001	1:4	1:2
010	1:8	1:4
011	1:16	1:8
100	1:32	1:16
101	1:64	1:32
110	1:128	1:64
111	1:256	1:128

Registrador INTCON

O registrador INTCON ativa ou desativa as interrupções do TIMER0, mudança de estado da PORTB e interrupção externa no pino RB0, além de ter três bits reservados ao pedido de interrupção destes periféricos.

- Bit 7 (GIE): permite que o microcontrolador trate interrupções: 1 = ativa as interrupções globais, 0 = desativa as interrupções globais;
- Bit 6 (PEIE): permite que o microcontrolador trate as interrupções vindas de periféricos: 1 = ativa as interrupções de periféricos, 0 = desativa as interrupções de periféricos;
- Bit 5 (TMR0IE): ativa a interrupção do TIMER0: 1 = ativa a interrupção do TIMER0, 0 = desativa a interrupção do TIMER0;
- Bit 4 (INTE): ativa a interrupção de RB0: 1 = ativa a interrupção de RB0, 0 = desativa a interrupção de RB0;
- Bit 3 (RBIE): ativa a interrupção por mudança de estado da PORTB: 1 = ativa a interrupção por mudança de estado da PORTB, 0 = desativa a interrupção por mudança de estado da PORTB;

- Bit 2 (TMR0IF): indica que ocorreu uma interrupção em TIMER0: 1 = ocorreu um “estouro” em TIMER0, 0 = não ocorreu um estouro em TIMER0;
- Bit 1 (INTF): indica que ocorreu uma interrupção em RB0 devido a mudança de estado previamente configurada no bit INTEDG do registrador OPTION: 1 = uma interrupção externa ocorreu, 0 = uma interrupção externa não ocorreu;
- Bit 0 (RBIF): indica que houve mudança de estado em pelo menos um dos pinos RB7, RB6, RB5 ou RB4: 1 = ocorreu mudança de estado, 0 = não ocorreu mudança de estado.

Registrador PIE1

O registrador PIE1 contém os bits individuais para algumas interrupções de periféricos. É necessário ativar o bit PEIE (bit 6 do registrador INTCON) para que as interrupções deste registrador possam operar corretamente.

- Bit 7: não funcional;
- Bit 6 (ADIE): habilita interrupções do conversor A/D: 1 = interrupções habilitadas, 0 = interrupções não habilitadas;
- Bit 5 e Bit 4: não funcional;
- Bit 3 (SSPIE): habilita interrupções do módulo SSP: 1 = interrupções habilitadas, 0 = interrupções não habilitadas;
- Bit 2 (CCP1IE): habilita interrupções do módulo CCP: 1 = interrupções habilitadas, 0 = interrupções não habilitadas;
- Bit 1 (TMR2IE): habilita interrupções por *overflow* do TIMER2: 1 = interrupções habilitadas, interrupções não habilitadas;

- Bit 0 (TMR1IE): habilita interrupções por *overflow* do TIMER1: 1 = interrupções habilitadas, interrupções não habilitadas.

Registrador PIR1

O registrador PIR1 indica se qualquer interrupção de periféricos configuráveis no registrador PIE1 ocorreu.

- Bit 7: não funcional;
- Bit 6 (ADIF): indica se houve interrupção proveniente do conversor A/D: 1 = a conversão A/D finalizou, 0 = a conversão A/D não finalizou;
- Bit 5 e Bit 4: não funcional;
- Bit 3 (SSPIF): indica se houve interrupção proveniente do módulo SSP: 1 = uma interrupção ocorreu, 0 = nenhuma interrupção ocorreu;
- Bit 2 (CCP1IF): indica se houve interrupção proveniente do módulo CCP: 1 = uma interrupção ocorreu, 0 = nenhuma interrupção ocorreu. Caso o módulo esteja trabalhando em modo PWM, este bit não é utilizado;
- Bit 1 (TMR2IF): indica se houve interrupção proveniente do TIMER2: 1 = houve “estouro” do TIMER2, 0 = não houve “estouro” do TIMER2;
- Bit 0 (TMR1IF): indica se houve interrupção proveniente do TIMER1: 1 = houve “estouro” do TIMER1, 0 = não houve “estouro” do TIMER1.

Registrador PCON

O registrador PCON permite diferenciar se o microcontrolador reiniciou devido a um *reset* do tipo *brown-out* (queda de tensão no pino MCLR ou *overflow* do *watchdog timer*) ou se simplesmente aconteceu um *power-on reset* (o microcontrolador reiniciou ao ser ligado à alimentação).

- Bit 7 ao Bit 2: não funcional;
- Bit 1 (POR): indica se o *reset* ocorreu devido ao POR: 1 = *power-on reset* não ocorreu, 0 = *power-on reset* ocorreu;
- Bit 0 (BOR): indica que um *reset* do tipo *brown-out* ocorreu: 1 = não ocorreu um *reset* do tipo *brown-out*, 0 = ocorreu um *reset* do tipo *brown-out*.

Organização da Memória

O PIC16F72 possui dois grandes blocos de memória distintos, sendo um para o programa e o outro para os dados. Cada bloco possui o seu próprio barramento, portanto o microcontrolador pode acessar ambos os blocos simultaneamente.

Memória de Programa

A memória de programa é implementada usando a tecnologia FLASH, o que torna possível programar e testar o microcontrolador inúmeras vezes antes de ser instalado em um dispositivo. O tamanho da memória de programa do PIC16F72 é de 2.048 endereços, variando do 0000h até 07FFh, sendo que o endereço 0000h é reservado ao vetor de *reset* e o endereço 0004h reservado ao vetor de interrupções, conforme ilustrado pela Figura C.7.

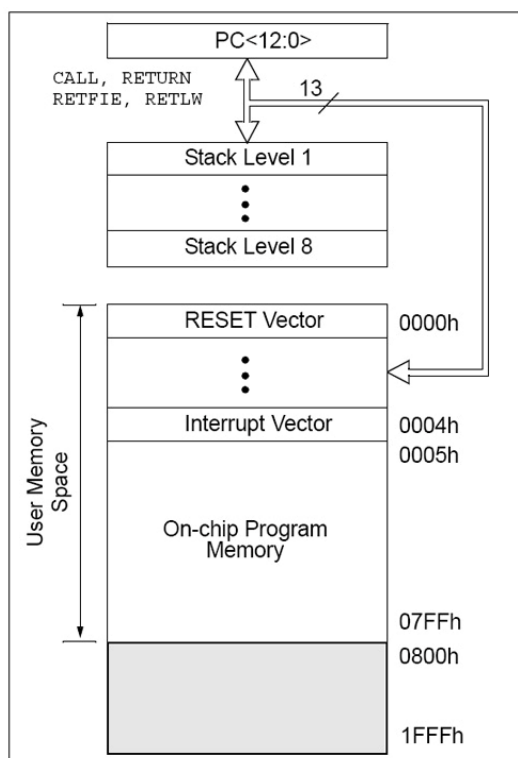


Figura C.7 – Organização da memória de programa do PIC16F72.

Fonte: Datasheet PIC16F72

Para que o microcontrolador possa “navegar” pela memória de programa, ele é dotado de um registrador especial de 13 bits denominado *Program Counter* (contador de programa), ou simplesmente PC, e do registrador *stack*, que no PIC16F72 possui oito níveis.

Enquanto o registrador PC guarda o endereço da instrução que será executada, o *stack* guarda o valor do contador de programa quando este faz um salto devido à instrução CALL ou a uma interrupção. Assim, caso qualquer instrução de retorno seja processada (RETURN, RETFIE ou RETLW), o PC busca o endereço no primeiro nível do *stack* e passa a apontar para esta posição. Um *stack* de oito níveis permite que oito subrotinas sejam chamadas consecutivamente, sem que haja retorno entre as chamadas.

Memória de Dados

A memória de dados pode ser dividida em duas partes, registradores de uso geral (GPR) e registradores de funções específicas (SFR), ambas de oito bits. A organização física da memória de dados no PIC16F72 é disposta em quatro bancos distintos, BANK0, BANK1,

Para que o microcontrolador acesse um banco de memória específico, é necessário que os bits 6 e 5 do registrador STATUS estejam devidamente configurados, conforme Tabela 6.3.

Interrupções

A interrupção é um mecanismo interno do microcontrolador que torna possível a resposta a um evento no momento em que este ocorre.

De modo geral, toda interrupção está associada a dois bits, um que habilita ou desabilita a interrupção e outro que indica que uma interrupção ocorreu.

A Figura 6.11 demonstra um esquema simplificado de uma interrupção e os bits de habilitação ou desabilitação.

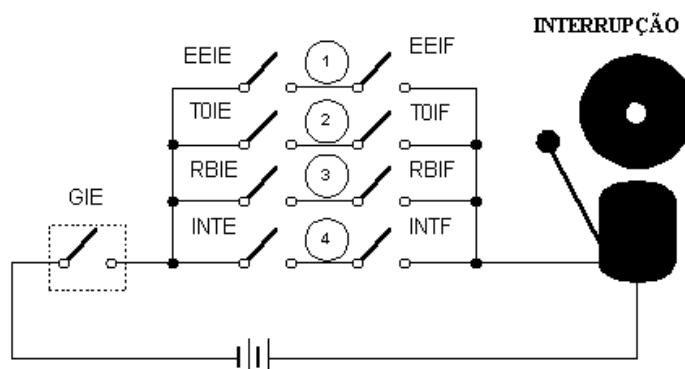


Figura C.9 – Simbolização de uma interrupção.

Fonte: Introdução aos Microcontroladores

O PIC16F72 possui oito fontes de interrupções distintas:

- Mudança de estado nos pinos RB4, RB5, RB6 ou RB7;
- Mudança de estado (deve ser especificado no programa) no pino RB0;
- “Estouro” do registrador TMR0;
- Fim da conversão do módulo A/D;

- Condição de interrupção (deve ser especificado no programa) verdadeira no módulo SSP;
- Comparação ou captura do módulo CCP completada;
- “Estouro” do registrador TMR1;
- “Estouro” do registrador TMR2.

Quando ocorre uma interrupção o contador de programa guarda a posição atual no *stack* e aponta para o endereço 0004h. Nesta posição da memória de programa deve ser colocada a rotina de tratamento de interrupções. É essencial que esteja contida nesta rotina uma subrotina para fazer *backup* dos registradores importantes, como o registrador W e o registrador STATUS, e também uma subrotina que identifique a origem da interrupção, caso se esteja trabalhando com várias fontes de interrupções.

As interrupções que ocorreram, porém foram ignoradas devido ao bit de interrupções globais estar desativado, serão executadas logo que este bit for ativado. Se isto for indesejado, é necessário igualar a zero os bits que indicam que uma interrupção ocorreu, antes de ativar todas as interrupções.

Timers

Os *timers* são registradores especiais que têm seu valor incrementado a cada ciclo de tempo. Portanto, pode-se medir o tempo, desde que conhecida a frequência de *overflow* do registrador.

O PIC16F72 possui três *timers*, sendo dois de 8 bits (TIMER0 e TIMER2) e um de 16 bits (TIMER1).

TIMER0

Possui um registrador de 8 bits e sua frequência de trabalho é diretamente proporcional à frequência interna do microcontrolador, podendo ser modificada configurando-se alguns bits, conforme ilustrado na Figura C.10.

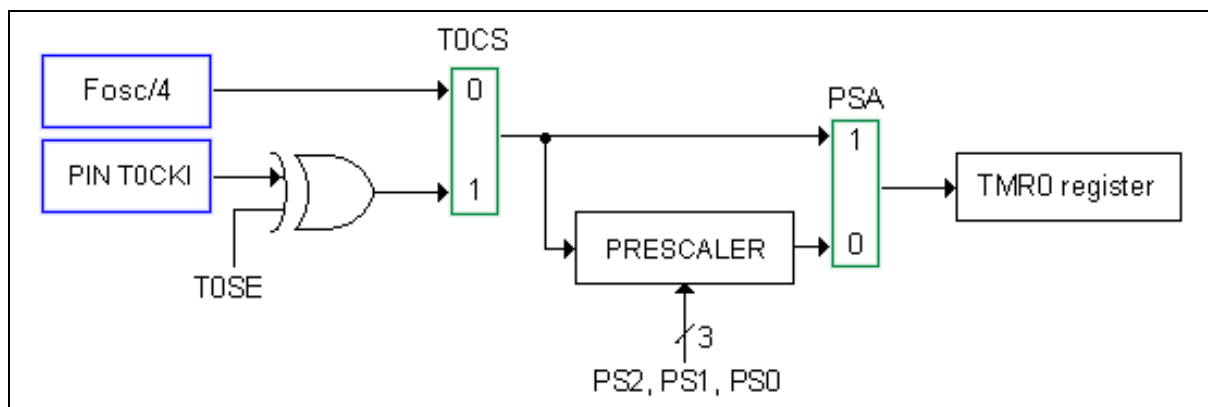


Figura C.10 – Diagrama do circuito do TIMER0.

Fonte: Introdução aos Microcontroladores

O bit T0CS indica se a fonte de oscilação será um oscilador externo ou o *clock* interno dividido por quatro. O bit PSA configura se a frequência de incremento do registrador TMR0 será exatamente o período do FOSC/4 ou será utilizado o *prescaler*, que pode ser configurado em uma relação de até 1:256 (um incremento a cada 256 pulsos).

TIMER1

Temporizador de 16 bits, possui dois registradores que guarda seu valor, TMR1L (parte baixa) e TMR1H (parte alta). Assim como o TIMER0, pode ser utilizado com o FOSC/4 ou com um oscilador externo. Pode ser utilizando tanto como um temporizador ou como um contador síncrono ou assíncrono.

Na Figura C.11 é mostrado o diagrama de blocos do TIMER1.

